



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

BRUNA TROVO CANIZELLA

**PROPOSTA DE NÍVEIS CRÍTICOS DE COBRE NO SOLO E
NA PLANTA DE SOJA EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

Londrina
2018

BRUNA TROVO CANIZELLA

**PROPOSTA DE NÍVEIS CRÍTICOS DE COBRE NO SOLO E
NA PLANTA DE SOJA EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

Trabalho de Tese apresentado ao Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Adônis Moreira

Londrina
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Canizella, Bruna Trovo.

Proposta de níveis críticos de cobre no solo e na planta de soja em sistema de plantio direto / Bruna Trovo Canizella. - Londrina, 2018.
73 f. : il.

Orientador: Adônis Moreira.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2018.
Inclui bibliografia.

1. Soja - Cultivo - Tese. 2. Solos - Teor de cobre - Tese. 3. Plantio direto - Tese. 4. Plantas - Nutrição - Tese. I. Moreira, Adônis. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

BRUNA TROVO CANIZELLA

**PROPOSTA DE NÍVEIS CRÍTICOS DE COBRE NO SOLO E NA
PLANTA DE SOJA EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

Trabalho de Tese apresentado ao Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Adônis Moreira
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Marco Antônio Nogueira
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Profa. Dra. Gisele Silva Aquino
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dra. Isabel Pereira Bruno
Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR

Londrina, 27 de abril de 2018.

AGRADECIMENTOS

À DEUS Onipresente, Onisciente e Onipotente;

Aos meus pais, Line e Reginaldo, pela oportunidade de aprender e pelo apoio em todos os momentos;

À Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela oportunidade oferecida;

À CAPES pela bolsa de doutorado concedida;

À Embrapa Soja pelo apoio logístico e infraestrutura para realização dos experimentos;

Ao meu orientador, Dr. Adônis Moreira não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela paciência;

À Pesquisadora, Dra Larissa A. C. Moraes, pelo apoio nas análises e ensinamento;

Aos professores da UEL pelos conhecimentos passados e aprendidos;

À Banca examinadora (Dr. Marco Antonio Nogueira, Dra. Gisele Silva Aquino e Dra. Isabeli Pereira Bruno) pelas sugestões no trabalho;

Ao Laboratório Santa Rita, em especial ao Edelfonso, Jussara e Fernando pelo apoio nas análises;

Aos Técnicos do Laboratório de Solos da UEL;

A Equipe de Fertilidade e Microbiologia da Embrapa Soja (Edilson, Fábio, Fernandes, Junior, Mauro, Sérgio e Zucca) pelo apoio na realização dos experimentos de campo;

A todos colegas da Pós-Graduação que de forma direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho.

CANIZELLA, Bruna Trovo. **Proposta de níveis críticos de cobre no solo e na planta de soja em sistema de plantio direto**. 2018. 73 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

RESUMO

No sistema de plantio direto a permanência da palhada da cultura anterior contribui para o aumento do teor de matéria orgânica do solo o que pode acarretar em deficiência de cobre (Cu), devido à forte afinidade deste por grupos funcionais (carboxila, carbonila e fenol) presentes MOS, com formação de complexos rígidos que impedem a passagem para a fase líquida, indisponibilizando-o para a absorção pelas raízes das plantas. Nesse contexto, observa-se a necessidade de se definir dose e nível crítico de Cu para as culturas em SPD. Para tal, foram realizados experimentos a campo e em condições controladas com a cultura da soja seguida do trigo. No campo o cultivo se deu sobre um Latossolo Vermelho Escuro distroférrico. As doses usadas foram de 0, 1, 2, 4 e 8 kg ha⁻¹ de Cu aplicado em cobertura antes do primeiro cultivo da soja. A soja e o trigo responderam significativamente à aplicação de Cu, com a máxima produção estimada (MPE) obtida na média das duas safras com as doses 4,4 e 4,2 kg ha⁻¹, respectivamente. Em relação a disponibilidade no solo, o trigo demandou, um nível crítico de Cu disponível de 15,5 mg kg⁻¹ com o DTPA-TEA e 20,5 com Mehlich 1, enquanto a soja de 7,7 e 14,1 mg kg⁻¹, respectivamente. Na soja, somente o número de vagens por planta e o teor de Fe nos grãos foram influenciados pelas doses de Cu. Resultados similares ocorreram com os componentes fisiológicos da soja e a taxa fotossintética (A) e teor de clorofila do trigo. Em casa de vegetação objetivou-se avaliar a interação dos teores de MO e Cu na soja e seus reflexos sobre a produção de grãos, em função de doses de Cu em dois solos com diferentes teores de MO, foi realizado um experimento em delineamento inteiramente ao acaso em esquema fatorial 2 × 5, com quatro repetições, constaram de cinco doses de Cu (0, 1, 2, 4 e 8 mg kg⁻¹ - fonte CuSO₄) e dois tipos de solo [Latossolo Vermelho distrófico, 26,9 g kg⁻¹ de MO e 610 g kg⁻¹ de argila) e Argissolo Amarelo distrófico, 14,6 g kg⁻¹ de MO e 357 g kg⁻¹ de argila]. Houve interação significativa de tipo de solo × doses e na média, a soja respondeu a adubação com Cu com a maior produção estimada obtida com aplicação de 4,1 mg kg⁻¹, o mesmo foi observado para produção de matéria seca da parte área, número de vagens e comprimento de raízes. Os atributos químicos e os teores dos nutrientes nas folhas e nos grãos foram influenciados somente pelo tipo solo, enquanto nos componentes fisiológicos houve efeito dos dois tratamentos para a taxa fotossintética e concentração intercelular de CO₂. Independente do teor de MOS e argila, os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA foram eficientes na determinação do Cu disponível do solo.

Palavras-chave: *Glycine max.* *Triticum aestivum*. Atributos químicos solo. Componentes de produção. Estado nutricional das plantas.

CANIZELLA, Bruna Trovo. **Proposal of critical levels of copper in soil and the soybean plant in direct plantation system.** 2018. 73 p. Thesis (Doctor's Degree in Agronomy) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

ABSTRACT

In no-tillage system (NTS), the persistence of straw from the previous crop contributes to increase of soil organic matter (SOM), which can lead to copper (Cu) deficiency, due to its strong affinity for functional groups carboxyl, carbonyl and phenol) present in organic matter (OM), with formation of rigid complexes that prevent the passage to liquid phase, making it unavailable for uptake by plants roots. In this context, it is observed the need to define rates and critical Cu concentration in soil and plants on NTS. Two experiments were carried out in field and greenhouse conditions with soybean-wheat intercropping and soybean respectively. In field conditions, soybean and wheat were cultivated in a dystroferic Dark Red Latosol (Oxisol). The 0, 1, 2, 4, and 8 kg ha⁻¹ Cu rates were used and applied in broadcast before the first soybean cultivation. Soybean and wheat responded significantly to Cu application, with the maximum estimated yield (MEY) obtained in the average of the two harvests with 4.4 and 4.2 kg ha⁻¹ rates, respectively. Regarding soil availability, wheat required a critical level of available Cu of 15.5 mg kg⁻¹ with DTPA-TEA extractanta and 20.5 with Mehlich 1 extractant, while soybean was 7.7 and 14.1 mg kg⁻¹. In soybean, only the number of pods per plant and the Fe concentration in grains were influenced by Cu rates. Similar results occurred with the physiological components of soybean and photosynthetic rate (A) and chlorophyll content in wheat. In greenhouse conditions, the objective of this study was to evaluate the interaction between OM and Cu in soybean and its effects on grain yield, soil chemical attributes, nutritional status and yield components. Five Cu rates (0, 1, 2, 4, and 8 mg kg⁻¹ - CuSO₄ source) and two soil types [dystrophic Red Latosol (Oxisol), 26.9 g kg⁻¹ of OM and 610 g kg⁻¹ of clay) and dystrophic Yellow Argisol (Ultisol), 14.6 g kg⁻¹ of OM and 357 g kg⁻¹ of clay] were studied. There was significant interaction of soil type x rates and soybean responded Cu fertilization and MEY was obtained with 4.1 mg kg⁻¹ Cu application. Similarly, this result was observed for dry weight yield, number of pods, and length of roots. The soil chemical attributes and nutrient concentrations in leaves and grains were influenced only by soil type (Oxisol and Ultisol), while the physiological components there was an effect of the two treatments for the photosynthetic rate and intercellular CO₂ concentration. Regardless of the OM content and clay, Mehlich 1 and DTPA-TEA extractants were efficient to determinate the available Cu in the soil.

Key words: *Glycine max.* *Triticum aestivum.* Soil chemical attributes. Yield components. Nutritional state of plants.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** – Complexação de átomo de cobre (Cu) com matéria orgânica (ácido húmico) e mineral de óxido de ferro (Fe) (goethita) do tipo esfera interna (Modificado de ALCACIO et al., 2001).....18
- Figura 2** – Modelo de mecanismo de absorção do Cu para (a) plantas de estratégia I e (b) plantas de estratégia II (Adaptado de RYAN et al., 2013)24
- Figura 3** – Relação das doses de cobre (Cu) com a produção de grãos na soja e no trigo. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F37
- Figura 4** – Relação teor de cobre (Cu) disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA com a produção de grãos na soja e no trigo. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F38
- Figura 5** – Peso de grãos em resposta as doses de cobre em dois tipos de solo (Latosolo e Argissolo). *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F55
- Figura 6** – Relação do teor de cobre (Cu) disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA com do teor total de Cu nas folhas. *Significativo a 5% de probabilidade.....56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes de produção de soja e trigo influenciados pelas doses de cobre (Cu). Média dos dois anos agrícolas de cultivo.....	39
Tabela 2 – Média dos dois anos agrícolas de cultivo de soja e trigo dos atributos químicos do solo após cada influenciados pelas doses de cobre (Cu)	40
Tabela 3 – Relação das doses de cobre (Cu) com os teores de Cu disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA e com os teores foliares e nos grãos de soja e trigo nos dois anos agrícolas de cultivo.....	41
Tabela 4 – Média dos teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn e Zn influenciados pelas doses de cobre (Cu) nos dois anos agrícolas de cultivo de soja e trigo.....	42
Tabela 5 – Média dos teores nos grãos de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn e Zn influenciados pelas doses de cobre (Cu) nos dois anos agrícolas de cultivo de soja e trigo.....	43
Tabela 6 – Taxa fotossintética (A), concentração intercular de CO_2 (g_s), condutância estomática (C_i), taxa transpiratória (T_{mmol}), eficiência intrínseca de uso de água (EI_{UH_2O}) e teor de clorofila influenciados pelas doses de cobre (Cu). Média dos dois anos agrícolas.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	08
2	REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1	A CULTURA DA SOJA	10
2.2	A CULTURA DO TRIGO	11
2.3	SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	12
2.4	MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	14
2.5	COBRE NO SOLO	15
2.6	COBRE NA PLANTA	19
3	Capítulo 1	27
3.1	NÍVEIS DE COBRE NA ROTAÇÃO SOJA-TRIGO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO	27
3.1.1	Resumo	27
3.1.2	Introdução	27
3.1.3	Material e Métodos	29
3.1.3.1	LOCAL E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	29
3.1.3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E CULTIVAR	29
3.1.3.3	ADUBAÇÃO, TRATOS CULTURAIS E COLETA DE DADOS	30
3.1.3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	31
3.1.4	Resultados e Discussão	32
3.1.4.1	PRODUTIVIDADE E COMPONENTES DE PRODUÇÃO	32
3.1.4.2	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	33
3.1.4.3	ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS	34
3.1.4.4	COMPONENTES FISIOLÓGICOS	35
3.1.5	Conclusões	36
3.1.6	Agradecimentos	36
3.1.7	Figuras	37
3.1.8	Tabelas	39

4	Capítulo 2	45
4.1	RESPOSTA DA SOJA CULTIVADA EM DOSES SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA E ARGILA À APLICAÇÃO DE COBRE	45
4.1.1	Resumo	45
4.1.2	Introdução	46
4.1.3	Material e Métodos	47
4.1.3.1	LOCAL E CARACTERÍSTICAS DO SOLO.....	47
4.1.3.2	DELINEAMENTO ESTATÍSTICO, ADUBAÇÃO E PLANTIO.....	48
4.1.3.3	<i>Colheita e análises laboratoriais</i>	48
4.1.3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	49
4.1.4	Resultados e Discussão	50
4.1.4.1	COMPONENTES DE PRODUÇÃO E SISTEMA RADICULAR.....	50
4.1.4.2	Atributos químicos do solo	51
4.1.4.3	Estado nutricional das plantas	52
4.1.4.4	COMPONENTES FISIOLÓGICOS	53
4.1.5	Conclusões	54
4.1.6	Agradecimentos	54
4.1.7	Figuras	55
4.1.8	Tabelas	57
5	CONCLUSÕES GERAIS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto é uma técnica de cultivo conservacionista que visa minimizar o revolvimento da camada superficial e manter o solo sempre coberto, mediante a adoção continuada da rotação de culturas. A palhada da cultura colhida é deixada na superfície e tem como principais funções proteger o solo do impacto da gota de chuva, causadora da compactação superficial e a consequente desagregação das partículas do solo, reduzir a erosão laminar, manter os atributos químicos e estruturais do solo, minimizar o desenvolvimento de plantas daninhas, favorecer a cultura subsequente, deixando no solo nutrientes que serão reciclados e disponibilizados às plantas, além de contribuir para o acúmulo e aumento do teor de matéria orgânica do solo do solo (MOS). A matéria orgânica do solo incorporada ao solo aumenta a atividade microbiana, favorecendo a reciclagem dos nutrientes.

Em vista da ausência de operações de preparo e incorporação dos corretivos, do acúmulo de restos vegetais e de adubos na camada superficial do solo, a semeadura direta pode interferir diretamente na disponibilidade de nutrientes, especialmente dos micronutrientes. A disponibilidade dos micronutrientes para as plantas está diretamente relacionada com o pH e o teor de MOS presente nos solos, que atua como um quelante natural. Com o aumento da MOS em áreas de plantio direto têm-se observado uma diminuição da disponibilidade de nutrientes no solo, entre os quais destaca-se o cobre (Cu), que é complexado pelos componentes da MOS (substâncias húmicas) ou húmus do solo, podendo induzir sintomas de deficiência nas plantas.

Embora exigido em pequenas quantidades, o Cu é essencial para o desenvolvimento das culturas, uma vez que desempenha importante papel na nutrição mineral das plantas, atuando como ativador de enzimas em diversos processos bioquímicos e fisiológicos, como a fotossíntese, respiração, regulação hormonal, fixação de nitrogênio (FBN) e metabolismo de compostos secundários. O fornecimento de Cu às culturas pode ser feito diretamente no solo, na forma de fertilizantes, ou na planta através de adubação foliar ou ainda por meio do tratamento de sementes ou fungicidas cúpricos. As fontes mais utilizadas podem ser sulfatos, hidróxidos, óxidos de cobre e defensivos a base de Cu.

Pesquisas têm mostrado deficiências ou toxidez de alguns elementos no solo, inclusive com aparecimento de sintomas visuais na planta. Essas

alterações em algumas propriedades químicas de solo estão ocorrendo em SPD, o que não ocorria no modelo de cultivo anteriormente utilizado, no qual se baseava no revolvimento da camada superficial do solo. Em relação ao Cu, sintomas de deficiência nas culturas anuais, como a soja e o trigo, são cada vez mais frequentes e o teores foliares encontrados estão, muitas vezes no limite ou abaixo dos níveis críticos considerados adequados.

O uso contínuo do SPD sem o manejo adequado da adubação com Cu e outros nutrientes, como o Ca, que é aplicado muitas vezes à lanço, pode afetar negativamente o rendimento de grãos e os componentes de produção da soja e do trigo, para isso, este trabalho foi realizado com o objetivo de definir níveis críticos e avaliar os efeitos da adubação com Cu na produção, estado nutricional, componentes de produção, componentes fisiológicos e atributos químicos do solo de soja e trigo cultivada em SPD e em diferentes níveis de MOSS e argila.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DA SOJA

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é considerada a principal cultura de grãos do país (CONAB, 2016), com produção prevista de 113 milhões de toneladas para a safra 2017/18 (USDA, 2018). Em termos mundiais também apresenta expressiva importância agrícola e sua produção para a safra 2016/2017 foi de, aproximadamente, 348 milhões de toneladas. O grão apresenta alto teor de proteína de boa qualidade (40%) e óleo (20%), o que consiste em uma das principais características (SEDIYAMA et al., 2009). Aproximadamente 90% dos grãos consumidos geram farelo e óleo na proporção de 80:20, portanto, o principal produto gerado nesse processo é o farelo, que, junto com o milho (*Zea mays* L.), constitui a matéria-prima para a fabricação de rações, sendo o seu principal produto derivado e dependente do mercado de carnes (HIRAKURI; LAZAROTTO, 2014). Outras formas de utilização do grão, porém em menor expressão, incluem produtos como óleo e proteína para a alimentação humana e ainda produção de biodiesel (MASUDA; GOLDSMITH, 2009).

A soja é uma cultura anual, cujo ciclo de desenvolvimento pode variar de 75 até 200 dias, dependendo da genética de cada cultivar. A identificação dos estádios de desenvolvimento é fundamental para o sistema de produção, sendo a descrição mais utilizada a de Fehr et al. (1971). Os estádios fenológicos são divididos em vegetativo e reprodutivo, sendo que o vegetativo se inicia na emergência das plântulas, quando as folhas cotiledonares estão abertas e em sequência seguem os estádios descritos de acordo com o número de nós que partem das folhas unifoliadas (V1, V2, V3, ..., Vn). O estágio reprodutivo inicia-se quando há pelo menos uma flor aberta em qualquer ponto da haste principal a partir do terço médio superior. No total são oito estádios que podem ser divididos em quatro fases, florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento das sementes ou grãos (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8) (NOGUEIRA et al., 2009).

2.2 CULTURA DO TRIGO

O trigo [*Triticum aestivum* (L.) Thell] é o segundo cereal mais produzido no mundo (MAPA, 2018), com projeção de produção de 738,51 milhões de toneladas de grãos na safra mundial 2016/17 (ABITRIGO, 2016). No Brasil, é cultivado nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, onde tem grande importância e há uma demanda crescente da população brasileira por derivados desse cereal, que é consumido na forma de pães, massas alimentícias, bolos e biscoitos, ou, também, como ração animal, quando não atinge a qualidade exigida para consumo humano (ITTT, 2013).

A qualidade do grão é influenciada pela interação de fatores, como condições ambientais de solo e clima, incidência de doenças e pragas, manejo da cultura, características genéticas da cultivar, assim como das operações de colheita, secagem, armazenamento e moagem (GUTKOSKI et al., 2007). O trigo é uma cultura de clima seco e normalmente sofre com o excesso de umidade. No Brasil, encontra-se situações distintas, nas regiões tritícolas situadas ao sul, o excesso de precipitação favorece o desenvolvimento de doenças (OSÓRIO, 1992).

Para cultivar o trigo o solo deve apresentar boas condições físicas e de fertilidade, não são adequados solos rasos, muito arenosos, pedregosos, salinos ou impermeáveis (ITTT, 2013). Quanto à acidez, devem apresentar reação ligeiramente ácida (pH 5,5 a 6,5). Solos ácidos ou alcalinos danificam o trigo indiretamente, por influenciar diretamente a disponibilidade de nutrientes, além de favorecer a presença de alumínio (Al) tóxico nos solos ácidos, reduzir a disponibilidade de nitrogênio (N) e alguns casos favorecer a ocorrência de patógenos (CASTRO; KLUGE, 1999).

A compreensão dos aspectos, relacionados ao desenvolvimento da planta de trigo, é fundamental para definir a formação de grãos e entender as possíveis limitações causadas pelo ambiente. Os estádios fenológicos da cultura podem ser divididos em duas fases principais, que ocorrem em sequência: vegetativa e reprodutiva. De acordo com RODRIGUES (2000), a fase vegetativa compreende as etapas em que, são diferenciadas somente as estruturas foliares. A fase reprodutiva (floração), engloba os períodos mais importantes para a definição do rendimento potencial, que estão delimitados pelos estádios de duplo-anel e de

início de formação da espiguetta terminal. A última fase, enchimento e maturação fisiológica dos grãos, define a massa final de cada grão.

2.3 SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

O sistema plantio direto é uma técnica de cultivo conservacionista do solo e tem como principais fundamentos a ausência do revolvimento do solo, sua cobertura permanente e rotação de culturas e gestão da propriedade agrícola (BRANDT et al., 2006). Também chamado de cultivo mínimo ou semeadura direta, os sistemas de manejo com menor revolvimento têm sido a melhor forma de manejo, visto que concilia produtividade, economia e equilíbrio ambiental (URCHEI et al., 2000). Além dos principais fundamentos, o SPD previne a erosão, a degradação da estrutura do solo, aumenta a capacidade de armazenamento de água no solo e proporciona menor variabilidade térmica deste (BONFIL et al., 1999; GALANTINI et al., 2000; MARTENS et al., 2001; NASCIMENTO et al., 2003).

A qualidade química do solo é influenciada positivamente pelo SPD em razão do aumento da MOS e da maior disponibilidade de nutrientes às plantas (CAVALIERI et al., 2004). Segundo Souza et al. (2008) e Santos e Lhamby (2001), o uso e a escolha de espécies com alta produção de fitomassa é de fundamental importância para manutenção do SPD de forma sustentável, principalmente em regiões com temperaturas elevadas, onde a decomposição da palhada é mais acelerada.

A prática da rotação de culturas, de acordo com Borkert et al. (2003), é importante no controle de pragas, doenças e ervas daninhas, assim também como forma de manejo da fertilidade do solo, pela capacidade de reciclar os nutrientes minerais da camada arável e os que tenham percolado para horizontes abaixo dela. Os restos vegetais das diferentes espécies utilizadas são deixados na superfície do solo após a colheita, assim os resíduos decompõem-se mais devagar do que quando são incorporados ao solo pelas operações de preparo convencional (ROMAN; VELLOSO, 1993). Além disso, propicia melhor aproveitamento de fertilizantes químicos e reduz custos com adubação, visto que contribui para a

manutenção do equilíbrio dos nutrientes e para o aumento da fertilidade e da atividade microbiana do solo (CARVALHO et al., 2004).

No SPD, a inexistência ou o revolvimento do solo somente no sulco de plantio está associada à manutenção de uma camada de resíduos orgânicos na superfície, permite um enriquecimento de material orgânico, aumento dos estoques de MOSS e estabilidade de agregados, com reflexos positivos na estrutura e na resistência do solo à compactação (REICHERT et al., 2011). Porém, este efeito depende do tipo de solo e condições climáticas (BALESDENT et al., 2000), visto que esses benefícios citados não ocorrem quando o solo é submetido a sistemas de preparo com intenso revolvimento (SILVA et al., 1994).

Bayer (1996) verificou redução de 50% na taxa de decomposição da MOS em SPD em comparação ao sistema de preparo com revolvimento do solo, com reflexos positivos no aumento dos estoques de carbono orgânico (CO) de um Argissolo Vermelho. Entretanto, num Latossolo Vermelho, o SPD diminuiu a taxa de decomposição da MOS em apenas 14%, com pequeno reflexo nos estoques de CO do solo.

A melhora na qualidade do solo no SPD também depende das culturas utilizadas, pois o número e a alternância de espécies vegetais na rotação de culturas podem alterar a quantidade, qualidade e forma de adição de C e N ao solo (OADES, 1995; SANTOS et al., 2011). A disposição temporal das espécies, a utilização de culturas para cobertura com elevada produção de fitomassa, tanto pela parte aérea como pelo sistema radicular (JANZEN et al., 1998) também podem interferir diretamente os estoques de C e N nas diferentes frações da MOS (BALESDENT et al., 2000; SIX et al., 2000; BAYER et al., 2001; SIX et al., 2002; CHEVALLIER et al., 2004; SISTI et al., 2004; DIEKOW et al., 2005), o que tem potencial para modificar significativamente a qualidade do solo.

2.4 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica do solo é um dos constituintes de maior importância do solo, é formada por resíduos de plantas, animais e microrganismos em diversos estádios de decomposição, em associação com os minerais do solo (CHRISTENSEN, 1992). Pode ser utilizada com indicador de qualidade do solo por ser fonte primária de nutrientes às plantas, influenciando a infiltração, retenção de água e susceptibilidade à erosão (GREGORICH et al., 1994; DORAN; PARKIN, 1994; MIELNICZUK, 1999). Além de atuar sobre outros fatores, como ciclagem de nutrientes, complexação de elementos tóxicos, além de aumentar a capacidade de troca de cátions (CTC) e no tamponamento do pH do solo (SILVA; PASCAL, 1999).

Segundo Azar (2013) e Smith e Bradford (2003), o processo de decomposição dos resíduos vegetais sofre influência das quantidades de C e N no solo. A qualidade da MOSS é indicada pela distribuição das diferentes frações de C orgânico do solo, que apresentam características químicas, físicas e morfológicas distintas. (GUARESCHI et al., 2013). Alguns trabalhos demonstram que os teores de ácidos fúlvicos e ácidos húmicos variam de acordo com o manejo adotado e a profundidade do solo, esses possuem altos teores de grupos funcionais contendo oxigênio na forma de carboxilas, hidroxilas fenólicas e carbonilas capazes de formar complexos com cátions, como o Cu^{2+} e Fe^{2+} presentes na solução do solo (SARGENTINI JÚNIOR et al., 2001; PASSOS et al., 2007).

A adoção do SPD incrementa os teores de MOSS e influencia a disponibilidade dos nutrientes às plantas, aumento da CTC e diminui as perdas por lixiviação. Porém, com a aplicação do calcário em superfície no SPD ocorre a elevação do pH em torno de 6,0 na camada superficial do solo (0 a 5 cm), e aumento da concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} , o que afeta a disponibilidade de outros nutrientes catiônicos (K^+ , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} e Zn^{2+}), por competirem pelo mesmo sítio de absorção (MALAVOLTA et al., 1997; MALAVOLTA, 2006).

2.5 COBRE NO SOLO

Na crosta terrestre a concentração de Cu é de aproximadamente 60 mg kg⁻¹, enquanto que no solo a variação na sua concentração está associada ao uso, com valores variando de 5 a 30 mg kg⁻¹ em terras agricultáveis, de 200 a 500 mg kg⁻¹ nas áreas de cultivo de videira, devido à aplicação excessiva de fungicidas à base de Cu, e de 700 a 4000 mg kg⁻¹ próximo de áreas de mineração de cobre (ALLOWAY, 2013; PRINTZ et al., 2016).

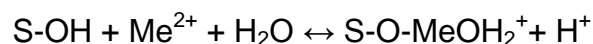
A predominância dos minerais de cobre é na forma de sulfetos, em sua maioria no estado de oxidação +1, pois o Cu reduzido (Cu¹⁺) forma forte ligação covalente com o ânion sulfeto (S²⁻). O Cu é mais abundante nas rochas basálticas que nas graníticas o que pode estar associado à maior ocorrência de sulfetos nas primeiras. Nas rochas carbonatadas observa-se uma tendência de exclusão, sendo as estruturas do metal com silicatos, óxidos e carbonatos menos estáveis quando comparadas às de sulfeto. Calcopirita (CuFeS₂) é o mineral de maior ocorrência na crosta seguido de calcocita (CuS₂) e bornita (CuFeS₄). Minerais secundários de Cu²⁺ como óxidos, carbonatos, silicatos, sulfatos e cloretos podem ocorrer e são relativamente solúveis, mas não persistem sob condições propícias à lixiviação (McBRIDE, 1981).

Após exposição às condições na superfície da terra, o Cu¹⁺ e Cu⁰ são oxidados ao estado de oxidação +2 (McBRIDE, 1981). Esta forma divalente (Cu²⁺) é a mais abundante no solo, principalmente como constituinte das estruturas cristalinas dos minerais primários e secundários (HAVLIN et al., 2005; MALAVOLTA, 2006). O processo de redução da forma Cu²⁺ para as formas Cu¹⁺ e Cu⁰ pode ocorrer em condições de alagamento devido à formação de um ambiente redutor proporcionado pelas baixas concentrações de O₂, pois essas formas reduzidas são termodinamicamente mais estáveis nessas condições (McBRIDE, 1981).

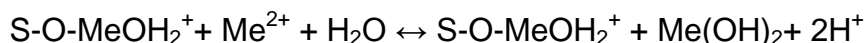
Além de presente na estrutura cristalina de minerais primários e secundários, o Cu está presente no solo em muitas outras formas. O solo é um sistema heterogêneo que consiste das fases sólida (material mineral e orgânico) e fluida (solução e ar) as quais interagem entre si, promovendo a degradação e transferência de biomassa, assim como o meio nutritivo para as plantas ao

disponibilizar os elementos essenciais. No solo, a disponibilidade de um nutriente para as plantas está na dependência de sua permanência na solução para que as raízes possam absorvê-lo (FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012). No entanto, processos chamados de retenção retiram os elementos da solução, onde estão disponíveis para as plantas, e passam para a fase sólida contígua. Esses processos podem ser de grande interesse não apenas agrônômico, mas também ambiental, principalmente em relação aos metais pesados como o chumbo (Pb), zinco (Zn) cádmio (Cd) cobre (Cu) e outros que em quantidades relativamente pouco elevadas podem ter ação tóxica (BRADL, 2004).

Dentre os mecanismos de retenção de um íon metálico, três processos se destacam: adsorção, precipitação e fixação. A adsorção é compreendida em termos de interações intermoleculares entre os solutos e a fase sólida. Estas interações no caso de metais pesados podem basicamente ser do tipo específica e menos reversíveis com formação de complexos de esfera interna entre o íon e um determinado grupo funcional da superfície da fase sólida, ou interações eletrostáticas onde o metal forma complexos do tipo esfera externa a uma certa distância da superfície e são mais fracas e reversíveis (BRADL, 2004). As adsorções específicas se baseiam nas reações do íon com grupos hidroxila da superfície (S) que são carregados negativamente em pH elevado pela doação de seu próton para a solução em troca do íon metálico (Me) como descrito a seguir:



Íons metálicos podem precipitar como óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfetos ou fosfatos e são dependentes tanto do pH como da concentração do íon presente na solução do solo. A precipitação pode ser descrita por duas reações, inicialmente ocorre a formação do complexo do cátion metálico e a superfície seguido de sua precipitação:



A fixação ocorre quando os metais adsorvidos em minerais de argila e óxidos metálicos se difundem nas estruturas de rede desses minerais, permanecendo fixados nos espaços dos poros da estrutura mineral (difusão em estado sólido) e é necessária a dissolução total das partículas em que são incorporados para que os metais pesados sejam removidos (BRADL, 2004).

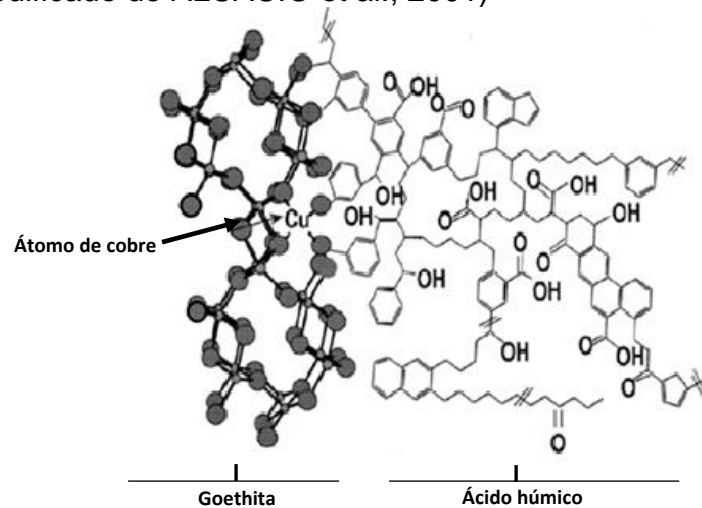
Em geral, o pH é o principal fator que governa a adsorção e disponibilidade de metais pesados como o níquel (Ni) e cádmio (Cd), devido a alterações nas espécies metálicas em solução e à variação na intensidade da desprotonação da superfície do solo carregada eletricamente, com o número de cargas negativas aumentando com o pH. Portanto, a adsorção dos metais é pequena em valores de pH baixos e em valores elevados os íons metálicos são quase que totalmente retirados da solução do solo (BRADL, 2004). No caso do Cu, devido à sua grande afinidade pela matéria orgânica do solo, esta desempenha papel fundamental na concentração do elemento na solução do solo, principalmente quando a matéria orgânica do solo se encontra associada à fração argila do solo, portanto, sua retenção na fase sólida do solo está associada à presença desse tipo de material. (WU et al., 1999).

A ligação do íon Cu^{2+} com a matéria orgânica do solo ocorre diretamente com dois ou mais grupos funcionais como os grupos carboxílico, carbonila e fenólico. A imobilização ocorre pela formação de um complexo rígido do tipo esfera interna (Figura 1). Outros metais como manganês (Mn), ferro (Fe) e cobalto (Co) formam com a matéria orgânica do solo complexo de esfera externa. O Cu^{2+} é praticamente o único que apresenta a capacidade de formar complexos de esfera interna em condições de baixo valor de pH (McBRIDE, 1981). Com o Cu^{2+} pode-se observar uma ordem de preferência no processo de adsorção pelos componentes do solo que é maior com o óxido de manganês (MnO), seguido pela MOS, óxido de ferro (Fe_2O_3) e alumínio (Al^{3+}) e minerais de argila, no entanto o óxido de Mn e a MOS do solo são os mais propensos a ligar o Cu^{2+} na forma não permutável, pois, quando adsorvido por minerais de argila e óxidos de ferro e alumínio, o Cu pode ser trocado por outros cátions e passar para a fase solúvel, porém a ligação a óxido de manganês e matéria orgânica do solo não permite essa troca (WU et al., 1999).

Na solução do solo a concentração do Cu^{2+} é muito baixa (0,01 – 0,06 μM) e ocorre na forma iônica (Cu^{2+}) ou complexada por agentes quelantes como ácidos orgânicos (cítrico, tartárico, málico, oxálico), metalóforos, fenóis e ácidos húmicos e fúlvicos (MALAVOLTA, 2006). As formas mais facilmente absorvidas pelas plantas são Cu^{2+} e Cu-quelado, mas, além da persistência dessas formas na solução, devido à imobilidade do Cu no solo, a sua absorção pelas plantas depende

da interceptação pelas raízes e, portanto, é necessário um bom desenvolvimento radicular que seja capaz de explorar mais amplamente o solo ao seu redor. (HAVLIN et al., 2005).

Figura 1 – Complexação de átomo de cobre (Cu) com matéria orgânica (ácido húmico) e mineral de óxido de ferro (Fe) (goethita) do tipo esfera interna (Modificado de ALCACIO et al., 2001)



Outro aspecto a ser observado na disponibilidade do Cu^{2+} para as plantas é a interação com outros elementos, principalmente com os nutrientes aplicados como fertilizantes. Altas doses de nitrogênio (N) causam sintomas de deficiência de Cu^{2+} devido ao estímulo do crescimento o que causa efeito de diluição da concentração, além disso, o excesso de N nas plantas reduz ainda mais a mobilidade do Cu^{2+} o que impede sua translocação para os pontos de crescimento. Altas concentrações de zinco (Zn^{2+}), Al^{3+} , fósforo (P) e Fe^{2+} na solução do solo restringem a absorção de Cu^{2+} e podem levar à deficiência nos tecidos vegetais (HAVLIN et al., 2005; MALAVOLTA, 2006).

2.6 COBRE NA PLANTA

O papel do Cu como cofator de inúmeras proteínas é essencial para a vida não só das plantas, mas também de outros organismos como bactérias, fungos e mamíferos. Nas condições fisiológicas encontradas nos tecidos vivos o Cu pode apresentar-se tanto na forma reduzida (Cu^{1+}) como na oxidada (Cu^{2+}) e cada uma dessas formas liga-se preferencialmente a determinado substrato. A forma reduzida tem afinidade por grupos de enxofre contendo tiol ou tioéster, apresentados pelos aminoácidos cisteína ou metionina, enquanto a forma oxidada liga-se a grupos de oxigênio ou de N imidazol, encontrados no ácido aspártico e glutâmico ou histidina (FESTA; THIELE, 2011). A ação do Cu no desempenho das proteínas resulta de sua habilidade de alterar, de forma cíclica, do seu estado oxidado (Cu^{2+}) para reduzido (Cu^{1+}) o que é útil nos processos ativos de transporte de elétrons e reações redox que envolvem oxigênio, apresentados pela maior parte das enzimas dependentes de Cu (BURKHEAD et al., 2009).

O Cu passou a ser fundamental a partir do momento em que a atmosfera foi se tornando enriquecida em O_2 , gerado pelos organismos fotossintetizantes, como as cianobactérias, promovendo um ambiente oxidante capaz de liberar o Cu^{1+} presente nos sais de sulfeto insolúveis o que levou à produção das formas solúveis (Cu^{2+}). Processo inverso ocorreu com o Fe^{2+} nessa condição oxidante que se tornou menos disponível devido à formação de compostos insolúveis como óxidos de ferro. Assim, enzimas que anteriormente utilizavam o Fe^{2+} , prontamente disponível em uma biosfera anóxica, passaram progressivamente a substituí-lo pelo Cu^{2+} , que é capaz de desempenhar funções semelhantes. Isso explica por que muitas proteínas de Cu^{2+} têm uma contrapartida funcional que usa Fe^{2+} como cofator (BURKHEAD et al., 2009). Além disso, com a utilização de recursos da bioinformática, comparando sequências de genomas, pôde-se revelar uma forte ligação entre a utilização do Cu^{2+} em processos bioquímicos e a crescente presença do O_2 na biosfera (RIDGE et al., 2008).

As plantas apresentam mais de 100 diferentes proteínas que contêm Cu, algumas associadas a processos essenciais para a vida como a fotossíntese e a respiração mitocondrial. Dentre essas, destacam-se a plastocianina, superóxido

desmutase, citocromo oxidase, diamina oxidase e polifenol oxidase (MALAVOLTA, 2006; YURELA, 2009; MARSCHNER, 2012).

A plastocianina participa da cadeia de transporte de elétrons do fotossistema I (PS I) e contém apenas um átomo de Cu por molécula. No entanto, cerca de 50% de todo o Cu presente na planta encontra-se no cloroplasto ligado a essa proteína, cuja proporção em relação ao número de clorofilas é de 3 a 4 moléculas da proteína para 1000 do pigmento. Na deficiência de Cu ocorre a redução da concentração da plastocianina assim como da atividade do PS I (FAGERIA, 2009; HÄNSCH; MENDEL, 2009).

Há vários tipos de isoenzimas de superóxido dismutase (SOD) com a mesma função de desintoxicar o superóxido (O_2^-) e podem utilizar metais como manganês (MnSOD), ferro (FeSOD) e cobre e zinco (CuZnSOD). A isoenzima de Cu e Zn apresenta um átomo de cada um desses metais que compartilham a ligação com o aminoácido histidina no sítio catalítico. Na deficiência de Cu observa-se um declínio na atividade da CuZnSOD associado ao aumento da atividade das demais isoenzimas (MnSOD e FeSOD) (BURKHEAD et al., 2009).

A citocromo C oxidase é uma proteína codificada pelo genoma mitocondrial e a oxidase terminal da cadeia transportadora de elétrons que ocorre nessa organela, portanto é fundamental na respiração e geração de energia necessária para a manutenção dos processos metabólicos dos organismos aeróbicos. Seu funcionamento depende da inserção de três átomos de Cu, além de dois de Fe e um de Zn, magnésio (Mg) e sódio (Na) (CARR; WINGE, 2003).

Diamina oxidase e polifenol oxidase estão envolvidas na formação de lignina e localizam-se principalmente no apoplasma, incluindo epiderme e xilema de tecidos maduros. Diamina oxidase catalisa a degradação de poliaminas liberando H_2O_2 que por sua vez sustenta a atividade de peroxidases necessárias na formação da lignina (WALTERS, 2003). Já a polifenol oxidase catalisa a oxidação de compostos fenólicos originados da rota do chiquimato e que podem ser convertidos em metabólitos secundários no metabolismo do fenilpropanóide, produzindo, entre outros compostos, os principais blocos que formam a lignina (unidades de guaiacil, siringil e p-hidroxifenil) (PARVEEN et al., 2010). A lacase, igualmente dependente do Cu^{2+} , é uma enzima vegetal que exerce um papel crucial e não redundante às

peroxidases na síntese de lignina, pois participam na polimerização desta (ZHAO et al., 2013)

Há ainda outros processos de grande importância para o crescimento e desenvolvimento da planta que também necessitam da presença de Cu como a formação de pólen, fertilização, nodulação e fixação simbiótica do N atmosférico, pois, na deficiência desse micronutriente, os efeitos deletérios na fotossíntese resultam na diminuição da eficiência da fixação de CO₂ e, portanto, numa menor concentração de carboidratos que são essenciais para que esses processos ocorram de forma adequada (FAGERIA, 2009; MARSCHNER 2012).

Embora o Cu seja essencial para o desenvolvimento e crescimento das plantas (MALAVOLTA, 2006), o seu excesso pode ser tóxico uma vez que o ciclo redox entre o Cu¹⁺ e o Cu²⁺ também catalisa a produção de radicais hidroxila (OH·) (Andrés-Colás, *et al.*, 2013). O radical OH· é uma molécula neutra, diferente do íon hidroxila (OH⁻) que apresenta carga negativa, e é altamente tóxica, pois são muito instáveis, ou seja, possuem vida curta, exatamente porque apresentam valências livres e os elétrons procuram sempre se agrupar em pares, tanto nos orbitais dos átomos quanto nas ligações covalentes. Assim, os elétrons desemparelhados dos radicais reagem ativamente com qualquer molécula próxima, formando novos compostos e provocando danos às membranas celulares e macromoléculas vitais como o DNA e proteínas (RODRIGO-MORENO et al., 2013).

A produção de OH· ocorre em uma reação denominada de Cupro-Fenton entre o Cu¹⁺ e o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), este último produzido no metabolismo do O₂ (Cu¹⁺ + H₂O₂ + H⁺ → Cu²⁺ + OH· + H₂O) (Rodrigo-Moreno et al., 2013). Na presença de excesso de H₂O₂, o radical OH· produzido da oxidação de Cu¹⁺ é consumido por outra molécula de H₂O₂ para produzir HOO· e O²⁻· (H₂O₂ + OH· → HOO· + H₂O ↔ O²⁻· + H⁺), igualmente tóxicos às células quando gerados em grandes quantidades (LIU et al., 2005).

Em condições adequadas de concentração de Cu no tecido vegetal, uma moderada formação de OH· promove a ligação deste a canais catiônicos não seletivos presentes na membrana plasmática, que podem ativar o influxo de Ca²⁺. Tal fato promoveria o crescimento das raízes e, portanto, o aumento da área de prospecção radicular para aquisição de minerais. Na disponibilidade excessiva de Cu ocorre a entrada maciça de Cu¹⁺ o que gera uma explosão de OH· que, além de

provocar danos às moléculas vitais como já explicado, pode causar a ativação dos canais de influxo de Ca^{2+} de um lado da membrana e a abertura dos canais e efluxo de K^+ do outro lado, ativando uma morte celular programada (programmed cell death, PCD) conduzida por caspases (proteínas chamadas de efetoras no processo de PCD) e inibindo o alongamento da raiz (RODRIGO-MORENO et al., 2013). O impedimento ao alongamento radicular pode também ser induzido no excesso de Cu pela restrição à redistribuição de auxinas através da interação com Pinformed1 (PIN1), um transportador de auxina responsável pelo fluxo acrópeto de auxina, ou seja, do ápice para o córtex radicular (YUAN et al., 2013).

O Cu em excesso reage facilmente com grupos tióis e pode deslocar outros metais essenciais em proteínas o que impede a função destas. Por outro lado, em situação de escassez as plantas podem alterar seu metabolismo direcionando a atuação do Cu para as enzimas chaves que garantam a sobrevivência do organismo. Em resposta a essas situações de escassez ou excesso de Cu as plantas apresentam uma estreita regulação de sua homeostase com a ação de inúmeras enzimas que trabalham de forma coordenada desde a absorção do metal, imobilização e distribuição para as organelas e proteínas alvo.

O mecanismo de absorção do Cu presente na solução do solo pelas raízes das plantas ainda não está totalmente elucidado. Embora as formas mais abundantes do Cu solúvel (Cu^{2+} e quelados) consigam penetrar no apoplasto das raízes das plantas, estudos recentes relatam a ocorrência de mecanismos específicos para a passagem do metal através da membrana plasmática que apresentam um padrão semelhante ao da absorção do Fe^{3+} altamente insolúvel (RYAN et al., 2013).

No caso do Fe, observam-se dois grupos de plantas distintos: as plantas de estratégia I (dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramináceas) que provocam a acidificação da rizosfera levando à dissolução dos óxidos de Fe e Al e à *up* regulação das Fe redutases, as quais reduzem Fe^{3+} a Fe^{2+} , enquanto as plantas de estratégia II (monocotiledôneas gramináceas) complexam o Fe^{3+} pela liberação de exudados de alta afinidade, os fitosideróforos (MARSCHNER; ROMHELD, 1994, ROBINSON, et al., 1999).

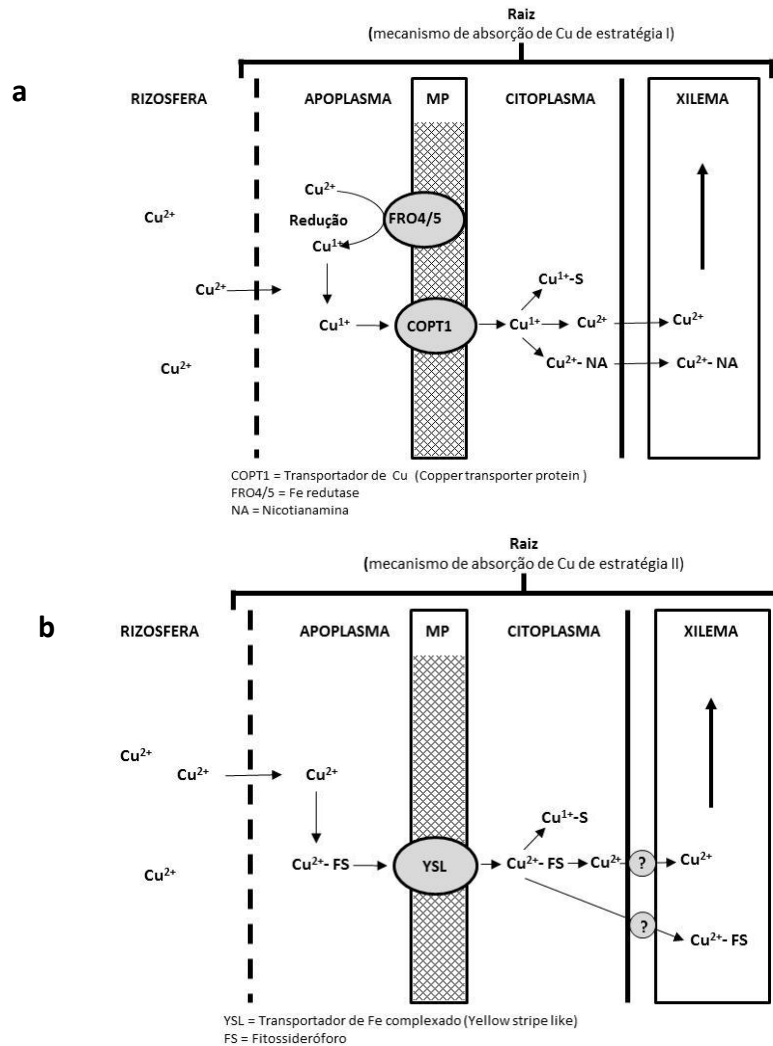
Para o Cu, verificam-se os mesmos dois grupos de plantas. Nas plantas da estratégia I a redução do Cu^{2+} para Cu^{1+} ocorre no apoplasto pela ação

das Fe redutase FRO4 e FRO5 presentes na membrana plasmática (BERNAL et al., 2012). Após a redução a proteína transportadora de Cu COPT1, que apresenta alta afinidade ao Cu^{1+} , facilita a passagem do metal através da membrana plasmática para o interior da célula vegetal. No citoplasma o Cu^{1+} pode ligar-se a grupos de enxofre, evitando o excesso que levaria à toxidez, ou ser novamente oxidado para Cu^{2+} e passar para o xilema como cátion ou associado à nicotianamina (Figura 2a) (RYAN et al., 2013). Nesse grupo de plantas observa-se fracionamento dos isótopos estáveis de Cu ($^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$) com notável enriquecimento do isótopo mais leve (^{63}Cu) nos tecidos vegetais, o que, provavelmente, decorre do processo redox que dirige a absorção do micronutriente na planta (NAVARRETE et al., 2011; RYAN et al., 2013).

A absorção do Cu nas plantas de estratégia II não depende de reações redox, nesse caso o mecanismo utilizado é o da complexação do micronutriente na forma oxidada com fitossideróforos. No modelo proposto, a absorção do complexo Cu^{2+} -fitossideróforo através membrana plasmática ocorreria com o auxílio da proteína transportadora de membrana YSL (yellow-stripe-like) sem indução de fracionamento isotópico. Na deficiência de Fe, a produção de fitossideróforos é aumentada, uma vez que esse é um mecanismo predominantemente associado à absorção de Fe, concluindo-se que o aumento na absorção de Cu frequentemente observado nessas condições pode resultar do aumento da formação do complexo Cu^{2+} -fitossideróforo. No citoplasma pode ocorrer a redução para Cu^{1+} e imediata ligação com grupos de enxofre de modo similar ao que ocorre com as plantas de estratégia I (Figura 2b) (RYAN et al., 2013).

Após ultrapassarem a barreira da membrana plasmática os íons de Cu em excesso são retirados do citosol, onde apenas pequenas quantidades são toleradas, pela ação de um eficiente mecanismo de entrega para os locais de utilização (mitocôndrias, cloroplastos, aparelho de Golgi) e proteínas dependentes do Cu. Esse mecanismo depende da atividade de proteínas citoplasmáticas específicas, solúveis e de baixo peso molecular denominadas Cu-chaperonas, constituindo uma estratégia fundamental na prevenção de interações inapropriadas do elemento com outros componentes celulares. A ação dessas proteínas difere de outros tipos de chaperonas geralmente envolvidas no auxílio ao dobramento adequado das proteínas (MIGOCKA; MALAS, 2018).

Figura 2 – Modelo de mecanismo de absorção do Cu para (a) plantas de estratégia I e (b) plantas de estratégia II (Adaptado de RYAN et al., 2013)



Embora a maioria dos solos não apresente níveis elevados de Cu que possibilitem a absorção excessiva, resultando em toxidez aos tecidos vegetais, as plantas apresentam distintas estratégias que controlam a quantidade desses íons (PRINTZ et al., 2016). Entre essas estratégias observa-se a redução do sistema de absorção, sequestro nos vacúolos e o efluxo através da membrana plasmática com acúmulo do íon no apoplasma. Chaperonas específicas também atuam na entrega do Cu às proteínas transportadoras que permitem a passagem tanto para o interior do vacúolo, mediada pela proteína denominada Heavy metal ATPase (HMA) (DEL POZO et al., 2010), como para fora da célula, mediada por uma proteína do tipo antiporter com o efluxo de Cu^{2+} sendo compensado pelo influxo de H^+ (PARROTTA et al., 2015).

Sintomas de toxidez variam muito entre espécies de plantas e tipo de tecido vegetal (Malavolta, 2006). De uma maneira geral, observa-se a redução da biomassa da planta como um todo e em especial das raízes devido ao acúmulo preferencial apresentado pela maioria das espécies, clorose do tecido vegetativo e, nos cloroplastos, danos nas membranas dos tilacóides associadas ao fotossistema II além de redução da absorção de Fe (BURKHEAD, 2009; MARSCHNER, 2012).

As Cu-chaperonas também desempenham papel fundamental em condições de deficiência de Cu, pois as plantas podem ajustar o metabolismo em situação de escassez, priorizando as funções mais essenciais para a sobrevivência e inibindo processos de menor importância ou promovendo a síntese de proteínas capazes de desempenhar funções similares às cuproproteínas como no exemplo da expressão da enzima superóxido desmutase (SOD) com acúmulo de FeSOD ou MnSOD em detrimento da Cu/ZnSOD. Este processo que aciona um modo de economia do Cu é mediado por Cu-microRNAs, cuja síntese é ativada pelo fator de transcrição responsivo ao Cu SPL7 que também ativa a expressão de genes envolvidos na assimilação do Cu (BURKHEAD et al., 2009; PRINTZ et al., 2016).

Os principais sintomas de deficiência de Cu apresentado pelas plantas incluem redução na taxa de crescimento, clorose das folhas mais jovens, enrugamento da margem das folhas e danos no meristema apical. Como efeito secundário observa-se redução na taxa transpiratória devido a depósitos insuficientes de lignina nas células dos vasos condutores do xilema. A deficiência causa ainda danos ao desenvolvimento e viabilidade do grão de pólen, produção de frutos e sementes, desenvolvimento do embrião e viabilidade das sementes (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012).

Muito se tem evoluído no conhecimento da maquinaria envolvida no controle da homeostase do Cu nos tecidos vegetais com identificação de interações de proteínas específicas e de um sofisticado sistema regulatório que envolve, além do fator de transcrição SPL, microRNAs. No entanto, muitas lacunas ainda estão por serem esclarecidas que incluem como exatamente ocorre a regulação dos microRNAs, bem como um limitado entendimento do mecanismo molecular pelo qual o Cu é distinguido dos demais íons absorvidos pela planta. Além disso, embora existam muitas enzimas dependentes de Cu com função biológica bem definida

(plastocianina, citocromo c oxidase e superóxido desmutase) existe uma série de cuproproteínas cujo papel ainda não foi esclarecido (BURKHEAD, 2009).

3 Capítulo 1

3.1 NÍVEIS DE COBRE NA ROTAÇÃO SOJA-TRIGO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO

3.1.1 Resumo: A introdução do sistema de plantio direto sem o revolvimento do solo tem acarretado em aumento contínuo do teor de matéria orgânica do solo com melhorias nas qualidades físicas e biológicas do solo. A ação quelatizante da MOS pode estar complexando o cobre (Cu) e tornando-o menos disponível para as plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar e definir a dose e o nível crítico de Cu em SPD em rotação soja e trigo cultivado em Latossolo Vermelho Escuro distroférrico. As doses usadas foram de 0, 1, 2, 4 e 8 kg ha⁻¹ de Cu aplicado em cobertura antes do primeiro cultivo da soja. A soja e o trigo responderam significativamente à aplicação de Cu, com a máxima produção estimada (MPE) obtida na média das duas safras com as doses 4,4 e 4,2 kg ha⁻¹, respectivamente. Em relação a disponibilidade no solo, o trigo demandou, um nível crítico de Cu disponível no solo de 15,5 mg kg⁻¹ com o DTPA-TEA e 20,5 com Mehlich 1, enquanto a soja de 7,7 e 14,1 mg kg⁻¹, respectivamente. Na soja, somente o número de vagens por planta e o teor de Fe nos grãos foram influenciados pelas doses de Cu. Resultados similares ocorreram com os componentes fisiológicos da soja e a taxa fotossintética (A) e teor de clorofila do trigo.

Keywords: *Glycine max*, *Triticum aestivum*, componentes de produção, estado nutricional, matéria orgânica do solo.

3.1.2 Introdução

A sucessão de cultivos no sistema de plantio direto contribui para manter o equilíbrio dos nutrientes no solo e aumentar a sua fertilidade com adição regular de resíduos orgânicos e contribui para a conservação do solo, promovendo, principalmente, a melhoria da aeração e a infiltração de água no solo, possibilitando maior penetração do sistema radicular (IGUE, 1984; LAL, 1986; DORAN; PARKIN, 1994). Por ser um processo contínuo, os sistemas de sucessão e de rotação de culturas também são fundamentais para a manutenção ou recuperação do conteúdo

de matéria orgânica do solo (FRANCHINI et al., 2007).

No entanto, por ser a MOS um quelante natural (HAVLIN et al., 2005), com o aumento do teor no solo, ocorre a formação de quelados muito estáveis com os ácidos fúlvicos e húmicos, diminuindo sua pronta disponibilidade para as plantas. No solo, a dinâmica do cobre (Cu) é bastante complexa e altamente influenciada por vários fatores do meio, principalmente a composição química, física e mineralógica do solo (McBRIDE et al., 1997). As várias formas do Cu presentes no solo podem estar tanto na fase sólida como na solução e sua distribuição entre essas duas fases tem influência, principalmente, da MOS e óxidos de ferro (Fe_2O_3) e manganês (MnO_2). Devido à grande afinidade do Cu pela MOS, é alta a fração orgânica do nutriente comparado com outros metais, embora as quantidades absolutas sejam baixas (McGRATH et al., 1998). A adsorção do Cu^{2+} com os componentes do solo apresenta a seguinte ordem: $\text{MnO}_2 > \text{MOS} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{mineral de argila}$, no entanto o MnO_2 e a MOS do solo são os mais propensos a ligar o Cu^{2+} na forma não permutável (WU et al., 1999). Na solução do solo, ocorre a complexação com ácidos húmicos e fúlvicos o que consiste em um mecanismo efetivo de retenção desse metal. Dentre os íons divalentes complexados pelos ácidos húmicos, o Cu^{2+} tem posição preferencial seguido do Pb, Fe, Ni, Co, Zn, Mn e Ca (ADRIANO, 2001).

Além da maior concentração e aporte contínuo de MOS com o cultivo em SPD, as recomendações de adubação do nutriente usadas pelos produtores ainda são baseadas em cultivos com revolvimento do solo sem levar em consideração esses fatores intrínsecos na formação de complexos e quelados (MALAVOLTA, 2006). Na planta, o Cu^{2+} é um metal de transição essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. É exigido em pequenas quantidades e seu nível endógeno ótimo pode variar substancialmente de acordo com a espécie e tecido vegetal (PRINTZ et al., 2016). De maneira geral, os níveis adequados desse micronutriente apresentam-se próximos de $6 \mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca, com níveis abaixo de $5 \mu\text{g g}^{-1}$, acarretando em sintomas de deficiência e acima de $20 \mu\text{g g}^{-1}$ em toxicidade para a maioria das plantas (MARSCHNER, 2012).

Nos tecidos vegetais o Cu desempenha uma série de funções e as principais estão relacionadas à sua ação como cofator redox ativo em uma grande variedade de proteínas como plastocianina, citocromo c oxidase, Cu/Zn-superóxido dismutase (Cu/Zn-SOD) e receptores de etileno. Portanto, processos biológicos vitais como fotossíntese, respiração mitocondrial, proteção contra estresse oxidativo,

metabolismo da parede celular e percepção de etileno não ocorrem de maneira adequada sem a presença do elemento (PUIG et al., 2007; BURKHEAD et al., 2009; YUAN et al., 2010).

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do Cu nos componentes de produção, estado nutricional, componentes fisiológicos e atributos químicos do solo e definir a dose e o nível crítico de Cu em SPD em rotação soja e trigo cultivado em Latossolo Vermelho Escuro distroférico.

3.1.3 Material e Métodos

3.1.3.1 LOCAL E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

O experimento foi realizado em área de sistema de plantio direto consolidado (10 anos de cultivo) sem irrigação em dois anos agrícolas (2014/2015 e 2015/2016) no campo experimental da Embrapa Soja, localizado no município de Londrina (23°23'30"S e 51°11'05"W), Estado do Paraná, região sul do Brasil, sobre um Latossolo Vermelho Escuro distroférico (Oxisol) com os seguintes atributos químicos antes da instalação do experimento: pH (CaCl₂) = 5,1, matéria orgânica do solo (MOS) = 33,2 g kg⁻¹, P (Mehlich 1) = 18,2 mg kg⁻¹, K⁺ (Mehlich 1) = 0,6 cmol_c kg⁻¹, Ca²⁺ = 4,3 cmol_c kg⁻¹, Mg²⁺ = 1,7 cmol_c kg⁻¹, S-SO₄²⁻ = 68,1 mg kg⁻¹, Al³⁺ = 0,1 cmol_c kg⁻¹, H⁺+Al³⁺ = 4,1 cmol_c kg⁻¹, capacidade de troca de cátions (CTC) = 11,5 cmol_c kg⁻¹, saturação por bases (V) = 57,4%, B = 0,5 mg kg⁻¹, Cu (Mehlich 1) = 6,8 mg kg⁻¹, Cu (DTPA-TEA) = 3,7 mg kg⁻¹, Fe = 93,4 mg kg⁻¹, Mn = 144,7 mg kg⁻¹, Zn = 5,5 mg kg⁻¹ e argila = 715 g kg⁻¹. O clima na região é o subtropical úmido Cfa (classificação de Köppen), sem estação seca com as temperaturas dos meses mais quente sempre superior a 22°C e umidade relativa do ar maior que 60%. A precipitação média anual é de 1600 mm com 60% das chuvas, geralmente, concentradas entre os meses de outubro a fevereiro (primavera e verão).

3.1.3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E CULTIVAR

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições. Foram estudadas cinco doses de Cu [0, 1, 2, 4 e 8 kg ha⁻¹ – fonte: sulfato de cobre (12% de Cu)] aplicados somente uma vez antes do primeiro cultivo da soja BRS 360 RR (porte médio, hábito de crescimento indeterminado e grupo de

maturação 6,0). Após cada cultivo da soja foi plantado em sucessão a cultivar de trigo (*Triticum aestivum* L.) BRS Pardela, para quantificar os efeitos residuais do manejo da cultura anterior (soja). A população utilizada no plantio foi de 250 mil plantas por hectare, no qual foram feitas apenas os tratos fitossanitários.

3.1.3.3 ADUBAÇÃO, TRATOS CULTURAIS E COLETA DOS DADOS

Exceto o Cu, os micronutrientes (B, Fe, Mn e Zn) foram aplicados na forma de sais misturados com o gesso agrícola (CaSO_4). No segundo cultivo da soja, a adubação foi feita com base na análise de solo obtida após o cultivo do trigo. Para o controle das ervas daninhas, nos estádios V_3 e V_6 (FEHR et al., 1971), as plantas receberam aplicação de glifosato (Roundup Ready®) na dose de 1,5 L/ha/aplicação (540 g a.e.ha⁻¹). As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium elkanii* + *B. japonicum* – SEMIA 587 e SEMIA 5019 ($4,0 \times 10^9$ células viáveis g⁻¹) e tratadas com solução contendo Mo, Co e Ni (TPS, 2013).

No período da manhã – estágio R2 (Fehr et al., 1971), foi determinada a taxa fotossintética líquida, A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática, C_i ($\text{mol H}_2\text{O M}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração intercelular de gás carbônico - CO_2 , G_s ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$), eficiência intrínseca do uso de água, EIUH_2O ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$) e taxa transpiratória, Trmmol ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) com medidor de fotossíntese LI-6400XT (LICOR®) dos 3º e 4º trifólios totalmente expandidos a contar do ápice de cinco plantas ao acaso por parcela. Posteriormente foi quantificada a unidade SPAD (CHLOROPHYLL METER SPAD – 502, Minolta Camera Co., 1989) de 20 plantas, nos quais foram posteriormente coletadas para realização das análises foliares. Os dados foram convertidos em teor de clorofila de acordo com equação de FRITSCHI; RAY (2007). Após a coleta, as folhas foram secas em ventilação forçada em estufa a $65^\circ \pm 5\text{C}$ até peso constante e moídas em moinho com peneira de 0,2 mm. O N total foi extraído por digestão sulfúrica e determinado pelo método micro-Kjeldahl (NELSON e SOMMERS, 1972), os teores totais de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn foram extraídos por digestão em solução nitricoperclórica. O P total foi determinado por espectrofotometria com azul de molibdênio, o S por turbidimetria e o B disponível de acordo com NOVOZAMSKY et al. (1983). O K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn total foram analisados por espectrofotometria de absorção atômica, de acordo com os métodos descritos por MALAVOLTA et al. (1997). No final do experimento (estádio R8) foram

coletadas 20 plantas das quatro fileiras centrais para determinação do número de vagens, peso de 100 sementes e número de grãos por vagem. A produtividade foi determinada na área de 3,0 m x 7,0 m deixando 50 cm de cada lado como bordadura. Semelhante às folhas, nos grãos foi determinada os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (MALAVOLTA et al., 1997).

Na cultura do trigo foi quantificada a produtividade, volume hectolitro (PH), clorofila (SPAD), altura de plantas e peso de 1000 sementes. No estágio 10.1 foram coletadas folhas em 20 plantas ao acaso dentro de cada parcela para determinação estado nutricional das plantas (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn - MALAVOLTA et al. 1997) e também determinado A, Gs, Ci, Trmmol e EIUH₂O. O teor de clorofila foi definido pela conversão da unidade SPAD com a equação descrita em Uddiling et al. (2007).

No final do ciclo de cada cultura foram retiradas amostras de solo na profundidade de 0-10 cm de cada tratamento para quantificação da fertilidade do solo (pH, C, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, H⁺+Al³⁺, B, Cu, Fe, Mn e Zn - EMBRAPA, 1997).

3.1.3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

De acordo com o delineamento proposto, foi realizado o teste de normalidade para as variáveis analisadas, e posteriormente submetidas à análise de variância (ANOVA) e comparadas pelo teste F, correlação e regressão a 5% de probabilidade (PIMENTEL GOMES, 2009).

3.1.4 Resultados e Discussão

3.1.4.1 PRODUTIVIDADE E COMPONENTES DE PRODUÇÃO

A produtividade de grãos de soja e trigo nas duas safras foi aumentada com o incremento das doses de Cu, com a maior produtividade média estimada (PME) obtida com as doses 4,4 e 4,2 kg ha⁻¹ de Cu, respectivamente (Figura 3). Em ambas as culturas, a interação ano x doses não foi significativa, indicando que apesar de apresentar produtividades diferentes, as doses de Cu tiveram a mesma tendência nas duas safras. Com aplicação de Cu, no primeiro ano, houve aumento na produtividade da soja de 12,5% e variou de 2946,8 kg ha⁻¹ (0 kg ha⁻¹ de Cu) a 3315,5 kg ha⁻¹ (4 kg ha⁻¹ de Cu) e na segunda safra o incremento foi de 34,0% na comparação das mesmas doses do nutriente. Wash et al (1972) verificaram que a aplicação acima de 18 kg ha⁻¹ de Cu, a produção é severamente afetada. No caso do trigo, a variação ocorreu em função das doses de Cu e também da época de cultivo (Figura 3), com aumento na produtividade de grãos de 29,4 e 8,6% na primeira e segunda safra entre as doses 0 e 4 kg ha⁻¹, respectivamente. Na comparação das duas épocas de cultivo, a produtividade de grãos do trigo variou em 62,6% (Figura 3). Segundo Fageria et al. (2010), o principal fator dessa diferença na produtividade de grãos entre as duas épocas de colheita se deve às variações das condições climáticas, principalmente, em função da sazonalidade e intensidade das chuvas e temperatura mínima e máxima de um ano para o outro durante todo o ciclo da cultura.

Mesmo com teor de Cu disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA antes do primeiro cultivo estar dentro da faixa indicada como alta (TPS, 2013), o incremento na produtividade de grãos da soja e do trigo em função das doses de Cu observado indica que o elevado conteúdo de matéria orgânica do solo no solo (33,2 g kg⁻¹) deva ter minimizado o efeito de toxidez do nutriente. Na soja, a quantidade aplicada para PME foi o dobro da dose de 2,2 kg ha⁻¹ e 2,0 kg ha⁻¹ obtidas por Makarin e Cox (1983) e Galvão (1991), também aplicada por ocasião do primeiro cultivo. Para o trigo, Garnett e Graham (2005) verificaram que plantas com baixo nível de Cu no substrato apresentaram a menor produção de grãos. Cabe destacar, que por ser aplicado como fungicida durante o ciclo vegetativo nas plantas

(ALLOWAY, 2013), são poucos os trabalhos que avaliaram a resposta das culturas à aplicação de Cu.

O NVP na soja e altura das plantas no trigo não apresentaram interação ano \times dose, mas foram influenciados pelas doses e ano de cultivo isoladamente, fato esse, não observado para NGV, peso de 100 sementes na soja e PH e peso de 1000 sementes no trigo (Tabela 1). O NVP variou de 58 (0 kg Cu ha⁻¹) a 75 (2 kg Cu ha⁻¹), com média de 69, o que representa incremento de 29%, enquanto a variação na altura de plantas no trigo foi 13% maior, passando de 0,67 m (0 kg Cu ha⁻¹) para 0,76 m (4 kg Cu ha⁻¹) com média de 0,72 m. Fageria et al. (2015) avaliando 30 genótipos de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), também verificaram aumento do NVP e altura das plantas com adição de Cu no solo. Assim, Brown e Foy (1964) também constataram aumento da altura de plantas de cevada (*Hordeum vulgare*) com aumento da aplicação de cobre. O aumento da altura das plantas e posterior redução observada pode estar relacionada ao fato de que o Cu atua no alongamento celular, processo complexo dependente da pressão de turgescência, síntese de componentes de parede e reguladores de crescimento (ALAOUI-SOSSÉ et al., 2004).

3.1.4.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Exceto o teor de Cu disponível no solo, e diferente do observado por Fageria e Baligar (2014) em solo com baixo teor de MOS, os atributos químicos do solo não foram influenciados pelo ano de cultivo e doses de Cu (Figura 4 e Tabela 2). Na média das duas coletas, os valores de pH, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, S-SO₄²⁻, B, Fe, Mn e Zn ficaram dentro dos níveis indicados como adequados para o cultivo da soja e trigo (ALVAREZ VENEGAS et al., 1999; TPS, 2013; ITTT, 2013). Apesar do alto teor no solo (TPS, 2013), os níveis críticos adequados de Cu disponível para a soja foram elevados (Figura 4) e ficaram dentro das faixas indicadas como alta 1,7 a 10,0 mg kg⁻¹ para o extrator Mehlich 1 e 1,1 a 7,0 mg kg⁻¹ para o DTPA-TEA. O teor de Cu na soja variou de 5,4 a 16,5 mg kg⁻¹ (Mehlich 1) e 3,3 a 9,5 mg kg⁻¹ (DTPA-TEA) e no trigo de 5,7 a 23,2 mg kg⁻¹ (Mehlich 1) e 3,4 a 16,5 mg kg⁻¹ (DTPA-TEA). O nível crítico adequado está bem acima dos indicados por Galvão (1999) e Alvarez Venegas et al. (1999) para o cultivo de grãos com revolvimento do solo. Com relação

aos valores verificados na soja e no trigo, a variação nos teores de Cu disponível, possivelmente se deve ao grau de decomposição da MOS, visto que a menor relação C/N da palhada da soja, que decompõe mais rápido do que as do trigo.

A relação doses e teor de Cu disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA apresentou efeito quadrático, com as maiores doses para o maior teor disponível ficando na faixa de 5,4 a 5,8 kg ha⁻¹ (Tabela 3). O alto coeficiente de correlação obtido entre os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA ($\hat{y} = 2,755 + 0,789x$, $r = 0,93$, $p \leq 0,05$) revelaram que os mesmos, em solo cultivado em SPD, apresentaram alta capacidade preditiva na determinação do Cu disponível no solo, podendo ser utilizados na análise de rotina. Resultados semelhantes foram obtidos por Bataglia e Rajj (1989) e Galrão (1999) na avaliação da disponibilidade de Cu por diferentes extratores em solo ácido dos trópicos.

3.1.4.3 ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS

A concentração foliar de Cu na soja e no trigo foram influenciados somente pelas doses de Cu com o maior teor obtido na dose 8 kg ha⁻¹ (Tabela 3). Na soja, as concentrações variaram de 5,9 a 8,7 mg kg⁻¹ e média de 5,4 mg kg⁻¹, enquanto nos grãos foi de 15,3 a 18,9 mg kg⁻¹ e média de 16,9 mg kg⁻¹. Mesmo com o efeito das doses de Cu, as concentrações foliares ficaram dentro da faixa de 2,6 a 17,2 mg kg⁻¹ indicada por Urano et al. (2006) como adequada para soja com produtividade acima de 4300 kg ha⁻¹. Com relação ao trigo, além do teor foliar, também houve efeito linear positivo das doses de Cu na concentração do nutriente nos grãos, cujos teores variaram na folha de 3,1 a 5,2 mg kg⁻¹ e média de 3,8 mg kg⁻¹ e nos grãos de 3,3 a 7,7 mg kg⁻¹ e média de 5,3 mg kg⁻¹, valores esses inferiores a 10±0,7 mg kg⁻¹ obtidos por MOREIRA et al. (2015) nas mesmas condições edafoclimáticas. Malavolta et al. (1997) citam que o nível de adequado de Cu no tecido vegetal do trigo deve ficar na faixa de 9 a 18 mg kg⁻¹. O aumento das concentrações de Cu nas plantas com o incremento das doses do nutriente também foi reportado por Walsh et al. (1972) no cultivo do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) e por Abreu et al. (1987) com a cultura do milho (*Zea mays*).

A aplicação de Cu e o ano agrícola não influenciaram as concentrações foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn e Zn na soja e no trigo

(Tabela 4), enquanto nos grãos houve efeito das doses de Cu somente na concentração de Fe, com redução significativa ($\hat{y} = 171,070 - 6,163x$, $R^2 = 0,71$, $p \leq 0,05$). Esse resultado corrobora Warters e Armbrust (2013), ao relatarem a presença de interação do Cu e Fe para aumentar ou diminuir o acúmulo de Fe e/ou Cu no tecido vegetal, ou seja, a atividade da redutase férrica é um indicador da demanda de Fe e pode ser inibida em altas concentrações de Cu. Na soja, exceto as concentrações foliares de P e K que ficaram acima e abaixo, os de N, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn e Zn situaram dentro das faixas indicadas por Malavolta et al. (1997) como adequadas para o cultivo da soja. Com relação ao trigo, somente as concentrações foliares de Ca, Mg e S ficaram dentro dos níveis indicados como suficientes, visto que os de P, B, Mn e Zn estavam acima e os de N, K e Fe abaixo dos valores considerados adequados (Malavolta et al., 2017). Nos grãos, as concentrações dos nutrientes na soja e no trigo ficaram dentro ou próximos dos valores médios obtidos por Moreira et al. (2016) com 24 cultivares e soja e por Souza et al. (2018), no estudo de eficiência de uso de aminoácidos.

3.1.4.4 COMPONENTES FISIOLÓGICOS

Na soja não houve interação significativa das doses de Cu \times anos de cultivo na A , C_i , g_s , $Trmmol$, $EIUH_2O$ e teor de clorofila, mas somente efeito das doses de Cu (Tabela 6), indicando que essa variável é independente, ou seja, somente com um ano de cultivo seria suficiente para quantificar estes resultados. Entre os componentes fisiológicos, houve efeito linear positivo para a A , $Trmmol$ e clorofila, negativo para $EIUH_2O$ e quadrática para C_i e g_s , e exceto o $EIUH_2O$, os menores valores foram verificados na ausência de aplicação de Cu (Tabela 6). Com relação ao trigo, somente a A e o teor de clorofila foram influenciados pelas doses de Cu e variaram de 14,69 a 16,67 $\square mol CO_2 m^{-2} g^{-1}$ e média de 15,58 $\square mol CO_2 m^{-2} g^{-1}$ e 364,67 a 417,45 $mg m^{-2}$ e média de 390,92 $mg m^{-2}$ (Tabela 6). Os resultados significativos dos componentes fisiológicos, principalmente a A e o teor de clorofila na soja e no trigo estão condizentes com as revisões de Hänsch e Mendel (2009) e Marschner (2012), ao relatarem a presença de relação direta dos níveis de Cu no tecido vegetal com as atividades fotossintéticas das plantas, visto que a plastocianina, enzima que atua na transferência de elétrons no fotossistema I é uma

proteína dependente da presença do nutriente (MALAVOLTA et al., 1997; MARSCHNER, 2012)

3.1.5 Conclusões

O cobre (Cu) teve sua disponibilidade para as plantas reduzida com a ausência de sua aplicação devido ao aumento do teor de matéria orgânica do solo no sistema de plantio direto, uma vez que esse nutriente forma com a MOS quelados e complexos rígidos que impedem a sua passagem para a fase solúvel do solo. Além disso, as doses e os níveis críticos no solo e na planta, no caso da soja, são para cultivares de hábito de crescimento determinado, enquanto o que predomina atualmente são as de hábito de crescimento indeterminado que (devido suas características intrínsecas) demanda maior quantidade do nutriente em todo o ciclo de crescimento. Na média dos dois cultivos, a máxima produção estimada (MPE) foi obtida com as doses 4,4 e 4,1 kg ha⁻¹ de Cu para o cultivo da soja e trigo em SPD, respectivamente, e no final do segundo ciclo de cada cultura, o nível crítico de Cu disponível no solo com os extratores Mehlich 1 (20,5 mg kg⁻¹) e DTPA-TEA (15,5 mg kg⁻¹) foi maior no trigo em comparação a soja (14,1 e 7,7 mg kg⁻¹) para obtenção da MPE. Na soja, houve efeito das doses de Cu no teor de Fe nos grãos e nos componentes fisiológicos, enquanto no trigo houve somente na taxa fotossintética (A) e no teor de clorofila. Os extratores DTPA-TEA e Mehlich 1 foram eficientes na determinação do Cu disponível no solo.

3.1.6 Agradecimentos

Ao Laboratório Santa Rita e a Universidade Estadual de Londrina (UEL) pelas análises de solo e planta (folha e grãos) e à equipe de Fertilidade e Microbiologia do Solo da Embrapa Soja pelo apoio na condução do experimento.

3.1.7 Figuras

Figura 3 – Relação das doses de cobre (Cu) com a produção de grãos na soja e no trigo. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F

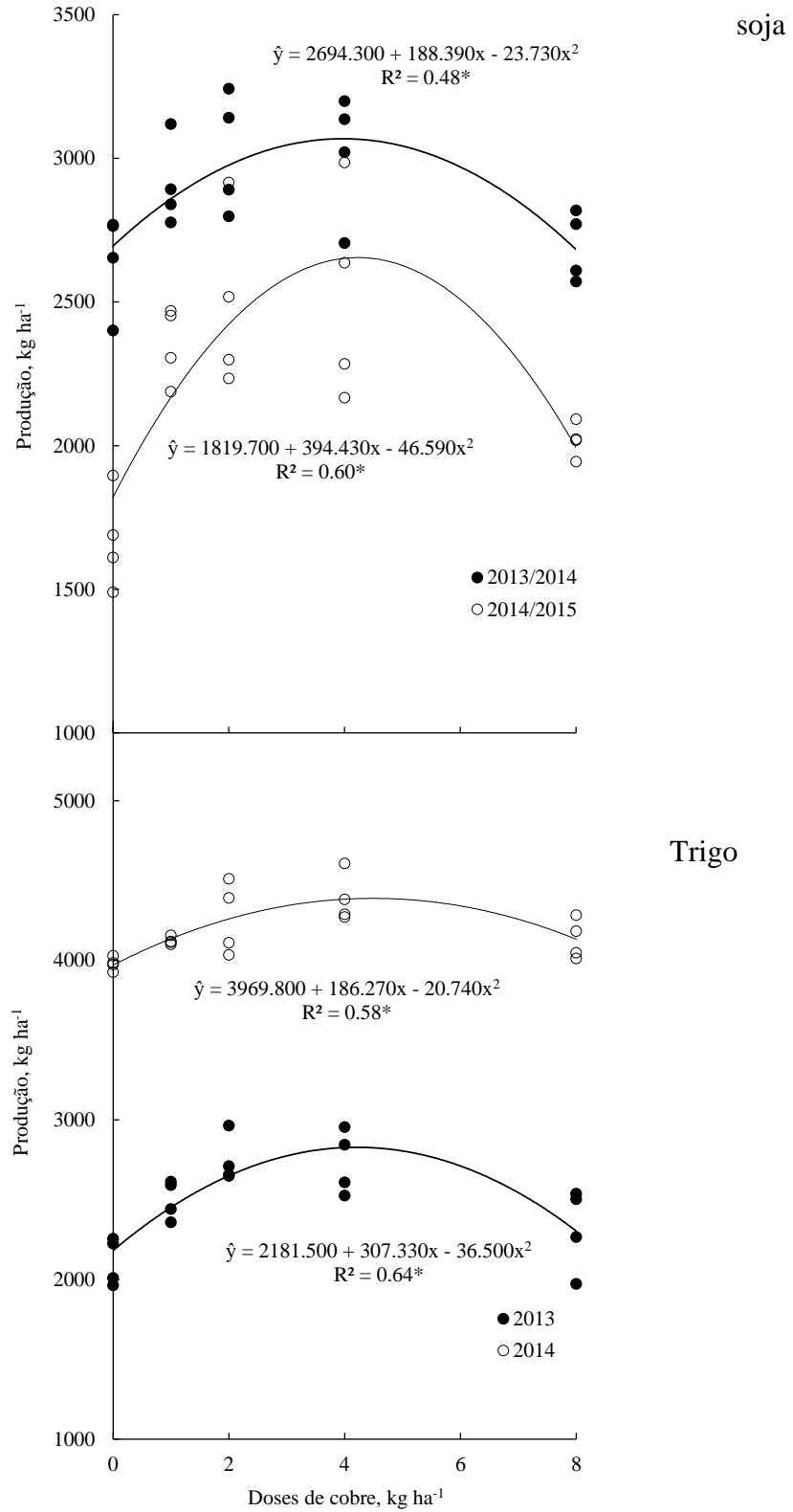
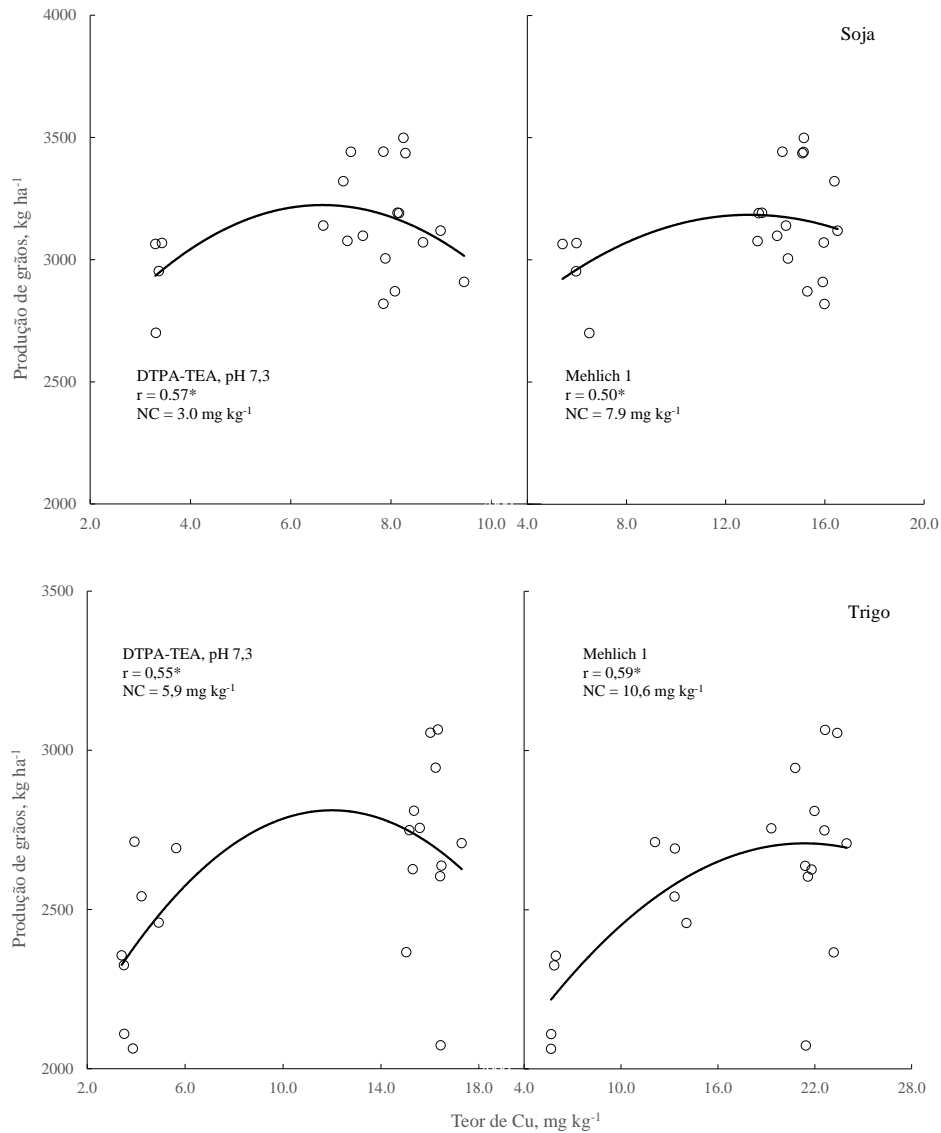


Figura 4 – Relação teor de cobre (Cu) disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA com a produção de grãos na soja e no trigo. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F



3.1.8 Tabelas

Tabela 1 – Componentes de produção de soja e trigo influenciados pelas doses de cobre (Cu). Média dos dois anos agrícolas de cultivo

Doses de Cu kg ha ⁻¹	Soja			Trigo		
	Grãos por vagem n	Vagens por planta n	Peso de 100 sementes g	Altura m	PH g	Peso de 1000 sementes g
0	2,2	58	12,3	0,67	80,9	31,0
1	2,0	71	12,7	0,72	80,5	30,4
2	2,0	75	12,5	0,73	81,3	30,6
4	2,0	72	12,3	0,76	81,4	31,2
8	2,0	67	12,8	0,73	81,1	30,5
Média	2,0	69	12,5	0,72	81,0	30,7
Teste F						
Ano	ns	*	ns	*	ns	ns
Dose	ns	*	ns	*	ns	ns
Ano x Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	8,81	16,23	14,24	16,19	8,55	10,42

Soja – vagens por planta (n), $\hat{y} = 61,554 + 6,623x - 0,754x^2$, $R^2 = 0,70^*$, $p \leq 0,05$; trigo – altura (m), $\hat{y} = 0,676 + 0,036x - 0,004x^2$, $R^2 = 0,96^*$, $p \leq 0,05$

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 2 – Média dos dois anos agrícolas de cultivo de soja e trigo dos atributos químicos do solo após cada influenciados pelas doses de cobre (Cu)

Doses Cu kg ha ⁻¹	pH CaCl ₂	C g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	CTC	S-SO ₄	B	Fe mg kg ⁻¹	Mn	Zn
Soja														
0	5,2	14,6	10,0	0,7	4,0	1,8	0,1	4,6	11,1	11,6	0,5	35,2	233,5	5,0
1	5,4	14,7	10,8	0,7	3,9	1,7	0,1	4,5	10,9	10,0	0,5	31,7	203,9	4,0
2	5,4	13,8	9,0	0,8	3,8	1,7	0,1	4,2	10,5	11,1	0,5	35,0	222,4	3,8
4	5,4	14,3	8,5	0,8	4,2	1,7	0,0	3,8	10,6	11,7	0,5	34,1	235,4	5,1
8	5,0	13,7	10,9	0,7	3,8	1,6	0,1	4,6	10,7	12,2	0,5	32,4	188,2	4,4
Média	5,3	14,2	9,8	0,7	3,9	1,7	0,1	4,3	10,7	11,3	0,5	33,7	216,7	4,5
Teste F														
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	8,12	12,17	12,94	14,10	8,99	11,74	15,40	16,11	12,63	7,82	11,08	23,44	17,96	13,96
Trigo														
0	5,2	13,0	7,0	0,8	4,8	1,8	0,1	4,5	11,9	10,2	0,6	36,0	169,4	5,7
1	5,6	14,0	6,9	0,8	5,3	2,1	0,0	3,8	12,0	8,9	0,6	36,3	169,5	5,8
2	5,2	13,7	8,5	0,9	5,0	1,9	0,0	4,3	12,1	11,6	0,5	36,5	158,9	5,6
4	5,1	14,3	6,6	0,8	4,9	1,9	0,1	4,8	12,4	10,0	0,5	36,4	157,4	6,1
8	5,1	13,0	9,3	0,9	4,9	1,9	0,1	4,8	12,4	10,4	0,5	36,4	153,6	5,7
Média	5,2	13,6	7,7	0,9	5,0	1,9	0,1	4,4	12,2	10,2	0,5	36,3	161,7	5,8
Teste F														
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	7,41	11,17	8,95	11,16	9,85	10,41	17,04	13,49	11,20	9,95	8,97	14,62	15,57	12,38

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 3 – Relação das doses de cobre (Cu) com os teores de Cu disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA e com os teores foliares e nos grãos de soja e trigo nos dois anos agrícolas de cultivo

Relação	Equação	R ²	DME
	Soja (2014/2015)		
Dose vs Teor de Cu no solo (Mehlich 1)	$\hat{y} = 11,361 + 1,707x - 0,144x^2$	0,83*	5,9
Dose vs Teor de Cu no solo (DTPA-TEA)	$\hat{y} = 5,914 + 0,881x - 0,067x^2$	0,82*	6,6
Dose vs Teor de Cu na folha	$\hat{y} = 7,095 + 0,774x$	0,77*	8,0
Dose vs Teor de Cu nos grãos	$\hat{y} = 16,059$	0,31 ^{NS}	-
	Trigo (2015)		
Dose vs Teor de Cu no solo (Mehlich 1)	$\hat{y} = 9,980 + 5,610x - 0,523x^2$	0,92*	5,4
Dose vs Teor de Cu no solo (DTPA-TEA)	$\hat{y} = 3,263 + 5,308x - 0,470x^2$	0,82*	5,6
Dose vs Teor de Cu na folha	$\hat{y} = 3,574 + 0,226x$	0,80*	8,0
Dose vs Teor de Cu nos grãos	$\hat{y} = 4,693 + 0,459x$	0,66*	8,0
	Soja (2015/2016)		
Dose vs Teor de Cu no solo (Mehlich 1)	$\hat{y} = 12,162 + 2,776x - 0,215x^2$	0,82*	6,5
Dose vs Teor de Cu no solo (DTPA-TEA)	$\hat{y} = 6,173 + 1,409x - 0,109x^2$	0,91*	6,5
Dose vs Teor de Cu na folha	$\hat{y} = 6,266 + 0,335x$	0,91*	8,0
Dose vs Teor de Cu nos grãos	$\hat{y} = 17,194$	0,04 ^{NS}	-
	Trigo (2016)		
Dose vs Teor de Cu no solo (Mehlich 1)	$\hat{y} = 9,565 + 4,045x - 0,329x^2$	0,93*	6,1
Dose vs Teor de Cu no solo (DTPA-TEA)	$\hat{y} = 4,461 + 3,957x - 0,307x^2$	0,96*	6,4
Dose vs Teor de Cu na folha	$\hat{y} = 2,249 + 0,361x$	0,78*	8,0
Dose vs Teor de Cu nos grãos	$\hat{y} = 3,373 + 0,414x$	0,88*	8,0
	Soja (Média)		
Dose vs Teor de Cu no solo (Mehlich 1)	$\hat{y} = 8,108 + 3,473x - 0,317x^2$	0,72*	5,4
Dose vs Teor de Cu no solo (DTPA-TEA)	$\hat{y} = 4,468 + 1,666x - 0,144x^2$	0,71*	5,8
Dose vs Teor de Cu na folha	$\hat{y} = 6,781 + 0,382x$	0,55*	8,0
Dose vs Teor de Cu nos grãos	$\hat{y} = 16,76$	0,01 ^{NS}	-
	Trigo (Média)		
Dose vs Teor de Cu no solo (Mehlich 1)	$\hat{y} = 6,883 + 7,124x - 0,662x^2$	0,90*	5,4
Dose vs Teor de Cu no solo (DTPA-TEA)	$\hat{y} = 2,752 + 5,683x - 0,504x^2$	0,84*	5,6
Dose vs Teor de Cu na folha	$\hat{y} = 2,911 + 0,293x$	0,81*	8,0
Dose vs Teor de Cu nos grãos	$\hat{y} = 4,033 + 0,437x$	0,90*	8,0

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 4 – Média dos teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn e Zn influenciados pelas doses de cobre (Cu) nos dois anos agrícolas de cultivo de soja e trigo

Doses Cu kg ha ⁻¹	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)	B (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Soja										
0	38,1	3,6	21,3	8,4	3,3	2,5	48,5	166,4	190,5	46,5
1	35,7	3,8	22,5	8,6	3,0	2,3	49,5	164,1	199,6	47,3
2	37,4	3,7	21,1	8,3	2,8	2,6	50,5	168,4	200,5	45,3
4	35,9	3,6	21,9	8,4	2,9	2,4	52,8	168,2	189,9	47,5
8	35,8	3,7	22,2	7,8	2,9	2,5	44,5	164,9	201,8	49,7
Média	36,6	3,7	21,8	8,3	2,9	2,4	49,2	166,4	196,5	47,3
Teste F										
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	10,62	8,84	7,68	8,11	7,63	9,94	17,52	13,69	14,45	12,96
Trigo										
0	25,4	7,2	18,8	4,3	1,5	2,8	24,4	83,6	185,3	30,4
1	28,5	7,5	20,3	4,6	1,5	2,6	26,1	93,8	173,9	23,9
2	25,8	7,2	19,2	4,1	1,4	2,6	26,0	97,2	175,5	25,8
4	30,3	7,2	18,8	4,7	1,5	2,7	26,2	99,6	203,8	35,0
8	28,0	7,5	19,7	5,1	1,6	2,5	24,7	129,5	176,4	27,5
Média	27,6	7,3	19,4	4,5	1,5	2,6	25,5	100,7	183,0	28,5
Teste F										
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	11,51	7,95	11,20	14,51	8,94	11,07	16,33	15,98	14,95	13,34

^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 5 – Média dos teores nos grãos de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn e Zn influenciados pelas doses de cobre (Cu) nos dois anos agrícolas de cultivo de soja e trigo

Doses Cu kg ha ⁻¹	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)	B (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Soja										
0	49,0	7,6	16,5	2,6	3,6	3,2	35,0	y	48,7	32,0
1	43,8	7,3	15,1	2,3	3,4	3,2	36,3	153,8	51,7	28,3
2	44,3	7,6	13,6	2,9	3,2	3,2	35,0	149,2	44,1	31,2
4	47,2	7,7	15,3	3,6	3,2	3,2	35,0	142,7	46,9	34,2
8	47,0	7,2	15,5	2,0	3,3	3,1	34,5	127,4	56,9	32,7
Média	46,3	7,5	15,2	2,7	3,3	3,2	35,2	152,0	49,7	31,7
Teste F										
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	9,74	8,88	10,17	12,63	10,95	8,91	12,47	13,51	14,97	13,41
Trigo										
0	28,0	5,0	7,9	15,6	17,2	1,1	44,1	47,5	43,9	43,6
1	24,3	4,9	7,2	16,9	16,8	1,3	34,4	39,6	36,3	36,6
2	24,9	5,1	7,7	17,3	17,4	1,3	38,0	50,4	39,3	43,4
4	26,6	5,1	7,9	15,0	16,1	1,2	41,3	46,1	40,9	44,1
8	26,7	5,0	7,8	16,1	15,1	1,2	33,2	47,0	45,0	45,3
Média	26,1	5,0	7,7	16,2	16,5	1,2	38,2	46,1	41,1	42,6
Teste F										
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	10,62	8,91	10,44	13,14	9,51	8,88	13,41	9,95	11,63	14,52

Soja – Fe, $\hat{y} = 171,070 - 6,162x$, $R^2 = 0,71^*$, $p \leq 0,05$.

^{NS}Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 6 – Taxa fotossintética (A), concentração intercular de CO₂ (g_s), condutância estomática (C_i), taxa transpiratória (Trmmol), eficiência intrínseca de uso de água (EIUH₂O) e teor de clorofila influenciados pelas doses de cobre (Cu). Média dos dois anos agrícolas

Doses Cu	A □ mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	g _s mol m ⁻² s ⁻¹	C _i □ mol mol ⁻¹	Trmmol □ mol m ⁻² s ⁻¹	EIUH ₂ O □ mol m ⁻² s ⁻¹	Clorofila mg m ⁻²
Soja						
kg ha ⁻¹						
0	14,19	0,27	269,08	2,23	6,36	228,30
1	14,23	0,48	305,53	3,00	4,74	232,80
2	15,70	0,54	331,40	2,86	5,48	234,88
4	16,00	0,57	299,06	3,24	4,93	235,97
8	16,10	0,35	286,81	3,35	4,80	238,76
Média	15,24	0,44	298,38	2,94	5,26	234,14
Teste F						
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	*	*	*	*	*	*
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	9,17	12,11	8,17	11,15	10,74	12,83
Trigo						
0	14,68	0,31	265,49	3,68	3,99	364,67
1	15,48	0,30	261,89	3,56	4,35	372,87
2	15,52	0,30	264,64	3,79	4,09	396,72
4	15,73	0,30	255,94	3,55	4,43	402,91
8	16,47	0,30	263,99	3,66	4,50	417,45
Média	15,58	0,30	262,39	3,65	4,27	390,92
Teste F						
Ano (a)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose (b)	*	ns	ns	ns	ns	*
a x b	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	11,63	9,98	13,12	9,43	11,17	13,65

Soja – A, $\hat{y} = 14,511 + 0,244x$, $R^2 = 0,65^*$; g_s, $\hat{y} = 8,307 + 0,143x - 0,170x^2$, $R^2 = 0,92^*$; C_i, $\hat{y} = 282,190 + 18,139x - 2,249x^2$, $R^2 = 0,48^*$; Trmmol, $\hat{y} = 2,391 + 0,337x - 0,027x^2$, $R^2 = 0,83$; EIUH₂O, $\hat{y} = 5,645 - 0,128x$, $R^2 = 0,45^*$; clorofila, $\hat{y} = 230,920 + 1,032x$, $R^2 = 0,76^*$. Trigo – A, $\hat{y} = 15,009 + 0,189x$, $R^2 = 0,87^*$; clorofila, $\hat{y} = 371,900 + 6,342x$, $R^2 = 0,85^*$, $p \leq 0,05$.

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

4 Capítulo 2

4.1 Resposta da soja cultivada em dois solos com diferentes teores de matéria orgânica e argila à aplicação de cobre

4.1.1 Resumo: Os efeitos das alterações do teor de matéria orgânica do solo (MOS) do solo na disponibilidade de cobre (Cu) sobre os componentes de produção, taxa fotossintética, estado nutricional e atributos químicos do solo no cultivo da soja nas condições tropicais e subtropicais não são muito conhecidos. Com o objetivo de avaliar a interação dos teores de MOS e Cu na soja e seus reflexos sobre a produção de grãos, em função de doses de Cu em dois solos com diferentes teores de MOS, foi realizado um experimento em delineamento inteiramente ao acaso em esquema fatorial 2×5 , com quatro repetições, constaram de cinco doses de Cu (0, 1, 2, 4 e 8 mg kg⁻¹ - fonte CuSO₄) e dois tipos de solo [Latossolo Vermelho distrófico, 26,9 g kg⁻¹ de MOS e 610 g kg⁻¹ de argila) e Argissolo Amarelo distrófico, 14,6 g kg⁻¹ de MOS e 357 g kg⁻¹ de argila]. Houve interação significativa de tipo de solo \times doses e na média, a soja respondeu à adubação com Cu com a maior produção estimada obtida com aplicação de 4,1 mg kg⁻¹, o mesmo foi observado para produção de matéria seca da parte aérea, número de vagens e comprimento de raízes. Os atributos químicos e os teores dos nutrientes nas folhas e nos grãos foram influenciados somente pelo tipo de solo, enquanto nos componentes fisiológicos houve efeito dos dois tratamentos para a taxa fotossintética e concentração intercelular de CO₂. Independente do teor de matéria orgânica do solo e argila, os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA foram eficientes na determinação do Cu disponível do solo.

Keywords: *Glycine max*, componentes de produção, estado nutricional, matéria orgânica do solo.

4.1.2 Introdução

O intenso revolvimento do solo no cultivo das culturas anuais acarretou na redução do estoque de matéria orgânica do solo, aumento das perdas por erosão hídrica e oxidação microbiana (BAYER et al., 2004; CAIRES et al., 2005). Esta perda de MOS refletiu também na diminuição da capacidade de troca de cátions (SILVA et al., 1994; BAYER et al., 2004) e na complexação de elementos tóxicos como o alumínio (Al^{3+}) (MENDONÇA, 1995). Com a introdução do sistema de plantio direto nessas áreas houve expressivo efeito na melhoria da qualidade de solos e aumento significativo dos estoques de MOS e melhoria da estabilidade de agregados (BALESDENT et al., 2000) e nos atributos químicos e biológicos do solo (FRANCHINI et al., 2007).

O incremento do teor de MOS no solo aumentou a quantidade de complexos e quelados estáveis com o Cu, como os ácidos húmicos e fúlvicos, com isso, sintomas de deficiência do nutriente têm ocorrido no campo, o que é agravado pela ausência de aplicação de Cu como fertilizante, ou seja, a quantidade do nutriente aplicado deveria ser maior para que o mesmo esteja prontamente disponível para as plantas (HAVLIN et al., 2005; MALAVOLTA, 2006). No caso do Cu, devido à sua grande afinidade pela MOS, esta desempenha papel fundamental na concentração do elemento na solução do solo, principalmente quando a matéria orgânica do solo se encontra associada à fração argila do solo, portanto, sua retenção na fase sólida do solo está associada à presença desse tipo de material (WU et al., 1999).

Na planta, o Cu é absorvido, preferencialmente, como íon $2+$ ou como quelados solúveis e sua absorção pode ser negativamente influenciada por altas concentrações de cálcio (Ca), fósforo (P), molibdênio (Mo) e zinco (Zn) na solução do solo (MALAVOLTA, 2006). Inúmeras enzimas são dependentes do Cu, uma delas é a plastocianina, que participa na fotossíntese, como doador de elétrons para a clorofila do centro de reação do fotossistema I e a citocromo oxidase no transporte de elétrons na respiração (HÄNSCH; MENDEL, 2009; MARSCHNER, 2012).

O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos do teor de matéria orgânica do solo e argila no solo sobre os componentes de produção, estado

nutricional, atributos químicos do solo e componentes fisiológicos da soja em resposta às doses de Cu aplicadas.

4.1.3 Material e Métodos

4.1.3.1 LOCAL E CARACTERÍSTICA DO SOLO

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação localizada na Embrapa Soja, Londrina, Estado do Paraná, Brasil (23°11'39" LS e 51°10'40" LW) para avaliar os efeitos do teor de matéria orgânica do solo e argila sobre os componentes de produção, atributos químicos do solo, componentes fisiológicos e concentração dos nutrientes foliar e nos grãos de soja. Os solos utilizados foram um Argissolo distrófico, coletado na profundidade de 0-20 cm no Município de Jaguapitã, Estado do Paraná (23°06'46" LS e 51°31'55" LW), com os seguintes atributos químicos (EMBRAPA, 1997) antes da aplicação dos tratamentos: pH (H₂O) = 5,3, matéria orgânica do solo do solo (MOSS) = 14,6 g kg⁻¹, fósforo - P (extrator Mehlich 1) = 3,9 mg kg⁻¹, potássio trocável – K⁺ = 0,22 cmol_c kg⁻¹, cálcio trocável – Ca²⁺ = 1,64 cmol_c kg⁻¹, magnésio trocável – Mg²⁺ = 0,85 cmol_c kg⁻¹, alumínio trocável – Al³⁺ (KCl 1,0 mol L⁻¹) = 0,0 cmol_c kg⁻¹, acidez potencial – H⁺+Al³⁺ = 2,8 cmol_c kg⁻¹, enxofre – S-SO₄⁻ = 8,0 mg kg⁻¹, capacidade de troca de cátions – CTC (ΣK⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺+Al³⁺) = 5,51 cmol_c kg⁻¹, saturação por bases – V [(ΣK⁺, Ca²⁺, Mg²⁺/CTC)×100] = 48,3%, B disponível (água quente) = 0,18 mg kg⁻¹, cobre disponível – Cu (Mehlich 1) = 0,73 mg kg⁻¹, Cu (DTPA-TEA) = 0,23 mg kg⁻¹, ferro disponível – Fe (Mehlich 1) = 43,80 mg kg⁻¹, , manganês disponível – Mn (Mehlich 1) = 2,60 mg kg⁻¹ e zinco disponível – Zn (Mehlich 1) = 3,24 mg kg⁻¹ e 357 g kg⁻¹ de argila e um Latossolo Vermelho distrófico coletado na profundidade de 0-20 cm no Município de Ponta Grossa, Estado do Paraná (25°05'42" LS e 50°10'43" LW), com pH (H₂O) = 5,0, matéria orgânica do solo = 26,9 g kg⁻¹, fósforo - P (extrator Mehlich 1) = 0,3 mg kg⁻¹, potássio trocável – K⁺ = 0,05 cmol_c kg⁻¹, cálcio trocável – Ca²⁺ = 0,69 cmol_c kg⁻¹, magnésio trocável – Mg²⁺ = 0,75 cmol_c kg⁻¹, alumínio trocável – Al³⁺ (KCl 1,0 mol L⁻¹) = 0,61 cmol_c kg⁻¹, acidez potencial – H⁺+Al³⁺ = 4,79 cmol_c kg⁻¹, enxofre – S-SO₄⁻ = 8,0 mg kg⁻¹, capacidade de troca de cátions – CTC (ΣK⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺+Al³⁺) = 6,28 cmol_c kg⁻¹, saturação por bases – V [(ΣK⁺, Ca²⁺, Mg²⁺/CTC)×100] = 23,3%, B disponível (água quente) = 0,15 mg kg⁻¹, cobre

disponível – Cu (Mehlich 1) = 1,87 mg kg⁻¹, Cu (DTPA-TEA) = 0,31 mg kg⁻¹, ferro disponível – Fe (Mehlich 1) = 79,12 mg kg⁻¹, manganês disponível – Mn (Mehlich 1) = 8,05 mg kg⁻¹ e zinco disponível – Zn (Mehlich 1) = 0,64 mg kg⁻¹ e 610 g kg⁻¹ de argila.

4.1.3.2 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO, ADUBAÇÃO E PLANTIO

Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente ao acaso com cinco doses de Cu (0, 1, 2, 4 e 8 mg kg⁻¹), com quatro repetições. Foram utilizados vasos de barro de 3,0 dm³ de capacidade de solo. Trinta dias antes do plantio foi aplicado o equivalente a 5,0 mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (MgO > 12%). Exceto N, que foi suprido pela inoculação das sementes com um coquetel de *Bradyrhizobium elkanii* + *B. japonicum* e as adubações com P, K, S, B, Co, Fe, Mn, molibdênio (Mo), níquel (Ni) e Zn foram feitas de acordo com Moreira et al. (2011) adaptadas de Allen et al. (1976) para experimentos conduzidos em condições de casa de vegetação [150 mg kg⁻¹ de P -fosfato monoamônio (MAP), 0,5 mg kg⁻¹ de B (H₃BO₃), 0,1 mg kg⁻¹ de molibdênio - Mo (Na₂Mo₄×2H₂O), 2,5 mg kg⁻¹ de Fe (FeSO₄×2H₂O), 0,01 mg kg⁻¹ de cobalto - Co (CoCl₂), 0,01 mg kg⁻¹ de níquel - Ni (NiSO₄×6H₂O), 5,0 mg kg⁻¹ de Mn (MnSO₄×3H₂O) e 5,0 mg kg⁻¹ de Zn (ZnSO₄×7H₂O)]. Nos estádios V2 e V4 foram feitas as adubações de cobertura parceladas duas vezes com 50 mg kg⁻¹ de K (K₂SO₄), totalizando 100 mg kg⁻¹ no ciclo.

Os vasos foram irrigados diariamente com água desionizada para manter o solo próximo de 70% do volume total de poros (VTP). Foram semeadas dez sementes da cultivar BRS 1010 IPRO de ciclo indeterminado, e após o desbaste foram deixadas duas plantas uniformes por vaso.

4.1.3.3 Colheita e análises laboratoriais

No estágio reprodutivo R2 (FEHR et al., 1971), no período da manhã, foi medido no terceiro e quarto trifólios a contar do ápice, a taxa fotossintética, A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática, g_s ($\text{mol H}_2\text{O M}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração, Trmmol ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO₂, C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e

calculado eficiência intrínseca de uso de H_2O , $EIUH_2O$ ($\square mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$) com a relação $A/Trmmol$, com o medidor de fotossíntese (LI-6400XT LICOR®, Lincoln NE). Neste estágio também foi determinada a unidade SPAD (MINOLTA, Osaka JP) nas mesmas folhas, sendo, posteriormente convertidas em teor de clorofila ($mg cm^{-2}$) pela equação $\hat{y} = 16,033 + (7,5774 \times SPAD)$ (FRITSCHI e RAY, 2007). Após as medições foram coletados os mesmos trifólios a partir do ápice (folha diagnóstico) de cada tratamento e secos em estufa de circulação forçada a $65^\circ C$ para determinação dos teores totais de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (MALAVOLTA et al., 1997).

Durante todo ciclo vegetativo foram coletadas as folhas senescente para obtenção da produção de matéria seca total da parte aérea da planta (MSPA). Após o estágio de maturação fisiológica (R8) foram quantificadas a produção de grãos (PG), número de vagens por vaso (NVV), número de grãos por vagem (NGV), peso de 20 sementes por vaso e número de vagens. Semelhante à folha diagnóstico, também foram determinados os teores totais de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos. Após a colheita, foram retiradas amostras de solo de cada vaso para determinação dos atributos químicos do solo (pH, MOS, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $H^+ + Al^{3+}$, Al^{3+} , CTC, B, Cu, Fe, Mn e Zn), conforme metodologias descritas pela EMBRAPA (1997). Os teores de Cu disponível no solo também foram extraídos por DTPA-TEA, pH 7,3 (LINDSAY; NORVELL, 1978).

4.1.3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados dos atributos químicos do solo, componentes de produção, componentes fisiológicos e estado nutricional das plantas foram submetidos aos testes de normalidade (HICKS, 1973), e posteriormente, submetidos à análise de variância (ANOVA), teste F, correlação e regressão a 5% de probabilidade.

4.1.4 Resultados e Discussão

4.1.4.1 COMPONENTES DE PRODUÇÃO E SISTEMA RADICULAR

A Figura 5 e Tabela 7 demonstram a presença de interação significativa entre tipo de solo com as doses de Cu para produção de grãos (PG), matéria seca da parte aérea (MSPA), número de vagens por vaso (NVV) e comprimento de raízes, indicando comportamento distinto das doses de Cu dentro de cada tipo de solo. Verificou-se que na média dos dois solos, a PG aumentou até aplicação de 4,1 mg Cu kg⁻¹ para máxima produção estimada (MPE), enquanto em cada solo, a MPE na soja cultivada em Latossolo foi obtida com 3,6 mg Cu kg⁻¹ e no Argissolo de 4,7 mg Cu kg⁻¹. O incremento na PG, MSPA e NGV verificado nos dois tipos de solo corrobora os resultados de Fageria et al. (2015) na avaliação de 30 cultivares de soja e está condizente com Malavolta (2006) e Marschner (2012), ao relatarem que o Cu atua, principalmente, na fotossíntese no fluxo de transporte de elétrons, respiração, fixação simbiótica de nitrogênio (N) e assimilação de N e enxofre (S) pelas plantas e na sua carência, a PG é severamente afetada, no entanto, para Walsh et al. (1972), concentrações no solo acima de 20 mg kg⁻¹ pode causar toxidez do nutriente no tecido vegetal. O comprimento de raízes variou de 34,0 a 51,8 cm e ficou na média em 42,5 cm na soja cultivada no Latossolo e de 31,5 a 41,5 cm, com média de 36,1 cm no Argissolo, o que representa um aumento de 52,3 e 31,7%, respectivamente, com o incremento das doses de Cu. O aumento do sistema radicular com adição de Cu foi reportado por Fageria e Baligar (2014) Na planta, em termos nutricionais, nas condições adequadas do teor de Cu no tecido vegetal, uma moderada formação de OH⁻ promove a ligação deste a canais catiônicos não seletivos presentes na membrana plasmática ativando o influxo de Ca²⁺ e promovendo o crescimento das raízes e, portanto, ocorre um aumento da área de prospecção radicular para aquisição de nutrientes (RODRIGO-MORENO et al., 2013).

O peso de 20 sementes por vaso e número de grãos por vagem (NGV) não foram influenciados pelos tratamentos (tipos de solo e doses de Cu) e ficaram na média em 3,4 g e 2 NGV (Tabela 7). Fageria et al. (2010) e Moreira e Moraes (2016) reportaram que quando ocorrem diferenças nessas duas variáveis, isso é devido, principalmente, as características genéticas de cada cultivar ou espécie, no

entanto, distúrbios nutricionais e fatores ambientais também podem alterar esses valores, fato esse, não observado no presente trabalho.

4.1.4.2 Atributos químicos do solo

Os valores de pH, C, P, K^+ , Mg^{2+} , $H^+ + Al^{3+}$, CTC e B no solo foram influenciados somente pelo tipo de solo e variaram do Latossolo para o Argissolo, na média de 4,7 a 6,5, 24,3 a 8,3 g kg^{-1} , 18,9 a 111,8 mg kg^{-1} , 0,09 a 0,05 $cmol_c kg^{-1}$, 1,9 a 1,0 $cmol_c kg^{-1}$, 7,1 a 1,9 $cmol_c kg^{-1}$, 11,7 a 5,3 $cmol_c kg^{-1}$ 0,8 a 0,3 mg kg^{-1} , respectivamente (Tabela 8). Em termos de pH, os resultados corroboram SODRÉ et al. (2001), ao verificarem que solos menos intemperizados como o Argissolo, apresentam como característica os maiores valores dessa variável. Exceto os teores de K trocável e o B disponível no experimento realizado em Argissolo, que ficaram a baixo, o pH, C, P, Mg^{2+} , $H^+ + Al^{3+}$ e CTC ficaram dentro ou acima dos níveis considerados adequados por Alvares Venegas et al. (1997) e TPS (2013). As variações significativas observadas na fertilidade do solo após o cultivo da soja, mesmo com a adubação de plantio semelhante, podem estar relacionadas ao material de origem da rocha (VENDRAME et al., 2007), influenciando o teor de MOS e a capacidade de adsorção dos coloides do solo (CORRÊA et al., 2004). A ausência de efeito das doses de Cu e suas interações com outros elementos indicadas por Loué (1993) demonstram que no Latossolo e Argissolo, a aplicação de doses até 8 vezes acima do indicado como adequado no cultivo em condições de casa de vegetação (MOREIRA et al., 2011) não ocasionaram em efeito negativo sobre os atributos químicos do solo. As concentrações de Ca^{2+} , Al^{3+} , $S-SO_4^{2-}$, Fe, Mn e Zn não foram influenciados pelos tipos de solo e doses de Cu e ficaram na média em 2,6 $cmol_c kg^{-1}$, 0,1 $cmol_c kg^{-1}$, 16,5 mg kg^{-1} , 71,2 mg kg^{-1} , 28,0 mg kg^{-1} e 8,5 mg kg^{-1} (Tabela 8).

Os teores de Cu disponível no solo obtidos com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA foram influenciados pelos dois tipos de solo e doses de Cu e apresentaram interação entre essas duas variáveis (Tabela 9). Mesmo com aplicação das mesmas doses de Cu, o Argissolo com 41,5% e 45,7% menos argila e MOS teve o menor teor de Cu disponível nos dois extratores no final do ciclo da soja, indicando maior disponibilidade do nutriente nesse solo para as plantas durante os

estádios vegetativo, o que não ocorreu com o Latossolo, o que está de acordo com Stevenson e Fitch (1981) e Malavolta (2006), ao relatarem que solos com maior teor de MOS apresentam maior capacidade de formação de complexos quelados com o Cu, com isso, a sua disponibilidade é a princípio diminuída e está diretamente relacionada com o processo de mineralização da MOS. Apesar dos valores obtidos com o extrator Mehlich 1 serem 92% maiores que o DTPA-TEA, ambos foram eficientes na determinação do Cu disponível e apresentaram correlação significativa entre si ($\hat{y} = 0,204 + 0,433x$, $r = 0,89$, $p \leq 0,05$) e com os teores foliares de Cu, independentemente do tipo solo (Figura 6).

4.1.4.3 Estado nutricional das plantas

As concentrações dos nutrientes nas folhas e nos grãos não apresentaram interação solo \times doses de Cu, porém, de acordo com a análise de variância, houve diferenças significativas somente do tipo de solo para as concentrações de N, P, Ca, Mg Mn e Zn nas folhas e P e Mn nos grãos (Tabelas 10 e 11). Exceto as concentrações de N e K nas folhas que ficaram abaixo, os demais nutrientes analisados ficaram dentro dos níveis indicados por Malavolta et al. (1997) como adequados. Nos grãos, as concentrações de N, P e S ficaram dentro das faixas de 58,8 a 68,8 g kg⁻¹, 4,4 a 6,0 g kg⁻¹, 2,2 a 3,4 g kg⁻¹ encontradas por Moreira et al. (2015), enquanto os níveis de K, Ca, Mg, B e Fe situaram acima e Mn e Zn abaixo dos obtidos pelo mesmo autor. As interações positivas de N/Cu e negativa Ca/Cu com o incremento das doses de Cu descritas por Malavolta (2006) e Marschner (2012) não foram verificadas, fatores, como a baixa concentração de N e alto de Ca no tecido foliar pode ter minimizado esse efeito (Tabela 4).

A concentração de Cu nas folhas foi influenciada com incremento das doses e os dois tipos de solo e a interação entre essas duas variáveis observada indica comportamentos distintos das doses de Cu sobre o teor foliar independentemente do nível de MOS e teor de argila no solo (Tabela 10). No Latossolo, houve efeito quadrático das doses de Cu sobre as concentrações do nutriente ($\hat{y} = 2,639 + 0,831x - 0,064x^2$, $R^2 = 0,68$, $p \leq 0,05$) e variaram de 2,0 a 6,0 mg kg⁻¹ e a DME para obtenção da maior concentração foliar foi de 6,5 mg kg⁻¹, enquanto no Argissolo o incremento foi linear ($\hat{y} = 3,722 + 0,334x$, $R^2 = 0,67$, $p \leq$

0,05) e variou de 3,0 a 7,0 mg kg⁻¹ e a DME de 8,0 mg kg⁻¹ de Cu. O aumento da concentração do nutriente no tecido foliar com incremento das doses do mesmo elemento são descritos em inúmeros trabalhos (FAGERIA et al., 2008; MOREIRA et al., 2016a).

Nos grãos (Tabela 11), o aumento das doses de Cu não acarretou em incremento na concentração do nutriente, cujos valores variaram de 4,7 a 9,9 mg kg⁻¹, com valor médio de 7,5 mg kg⁻¹ no Latossolo e de 4,0 a 7,4 mg kg⁻¹ e média de 5,8 mg kg⁻¹ no Argissolo. Segundo Malavolta (2006), a mobilidade do Cu mesmo sendo restrita na planta, depende do seu teor no tecido vegetal, visto que quando bem nutridas, o nutriente transloca com facilidade até os grãos, enquanto nas deficientes o movimento é mais difícil. Em razão das doses de Cu e na média dos dois tipos de solos, a concentração dos macronutrientes nos grãos apresentou a seguinte sequência: N>K>P>Ca>S>Mg e dos micronutrientes Fe>Zn>Mn>B>Cu. Moreira et al. (2016b), ao avaliarem 24 cultivares de soja, obtiveram sequência semelhante na concentração dos macronutrientes, enquanto nos micronutrientes o Fe e Mn apresentaram os maiores valores.

4.1.4.4 COMPONENTES FISIOLÓGICOS

A taxa fotossintética (A) e concentração intercelular de CO₂ (C_i) foram influenciadas pelo tipo de solo e doses de Cu, a taxa transpiratória (T_{rmmol}) somente pelas doses e a eficiência intrínseca do uso de água (E_{IUH_2O}) pelo tipo de solo, enquanto o teor de clorofila e condutância estomática (G_s) não foram alteradas pelos tratamentos (Tabela 12). Na média dos dois solos, houve efeito quadrático ($\hat{y} = 18,195 + 0,801x - 0,118x^2$, $R^2 = 0,79$, $p \leq 0,05$) e a maior A foi verificada na dose 2,0 mg kg⁻¹ e o estimado pela equação 3,4 mg kg⁻¹ de Cu. Já na C_i o efeito das doses de Cu foi quadrático no Latossolo ($\hat{y} = 279,920 + 8,085x - 1,316x^2$, $R^2 = 0,77$, $p \leq 0,05$) e linear no Argissolo ($\hat{y} = 310,910 + 3,847x$, $R^2 = 0,87$, $p \leq 0,05$). O efeito positivo do Cu na A e C_i são reportados por Malavolta (2006) e Hänsch e Mendel (2009), ao relatarem que o Cu²⁺ atua diretamente nos processos de fotossíntese e respiração, seja no transporte de elétrons ou como ativador enzimático.

Mesmo com os efeitos significativos das doses de Cu e dos tipos de solo verificados em algumas variáveis, os valores de A variaram de 14,51 a 22,14 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, C_i de 261,75 a 342,75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, G_s de 0,20 a 0,64 $\mu\text{mol mol}^{-1}$,

Trmmol de 2,99 a 4,15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, EIUH_2O de 4,47 a 7,39 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e clorofila de 297,63 a 323,86 mg m^{-2} foram semelhantes aos obtidos por Moreira et al. (2016a) em experimento realizado nas mesmas condições climáticas.

4.1.5 Conclusões

A disponibilidade de cobre (Cu) é influenciada, entre outros fatores, pelo pH, matéria orgânica do solo, textura, material de argila e interações com outros nutrientes, sendo absorvido pelas plantas preferencialmente como Cu^{2+} ou como quelados solúveis. O aumento do teor de MO no solo com a introdução do sistema de plantio direto e a ausência de adubação de reposição do nutriente pode estar diminuindo a disponibilidade de cobre (Cu) para as plantas e afetando os componentes de produção, taxa fotossintética, estado nutricional e atributos químicos do solo no cultivo da soja. Independentemente da quantidade de MOS e teor de argila no solo, a soja respondeu positivamente à adubação com Cu, e a maior produção estimada foi obtida com aplicação de 4,1 mg kg^{-1} na média dos dois solos. Similarmente, o mesmo foi observado para produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), número de vagens por vaso (NVV) e comprimento de raízes. Os atributos químicos e os teores dos nutrientes nas folhas e nos grãos foram influenciados somente pelo tipo solo, enquanto nos componentes fisiológicos houve efeito dos tratamentos (solo e dose) para a taxa fotossintética e concentração intercelular de CO_2 . Na média dos dois solos, o extrator Mehlich 1 extraiu 1,9 vezes mais Cu que o DTPA-TEA e ambos foram eficientes na determinação do Cu disponível do solo.

4.1.6 Agradecimentos

Ao Laboratório Santa Rita pelas análises de solo e planta (folhas e grãos) e à equipe de Fertilidade e Microbiologia do Solo da Embrapa Soja pelo apoio na condução do experimento.

4.1.7 Figuras

Figura 5 – Peso de grãos em resposta as doses de cobre em dois tipos de solo (Latossolo e Argissolo). *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F

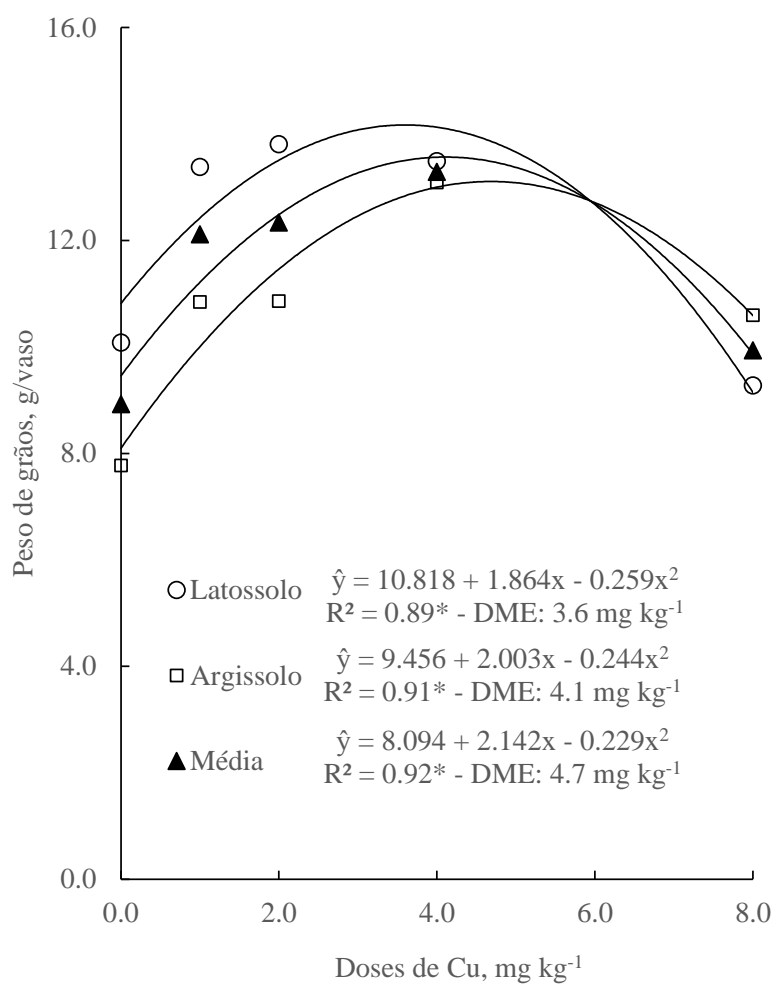
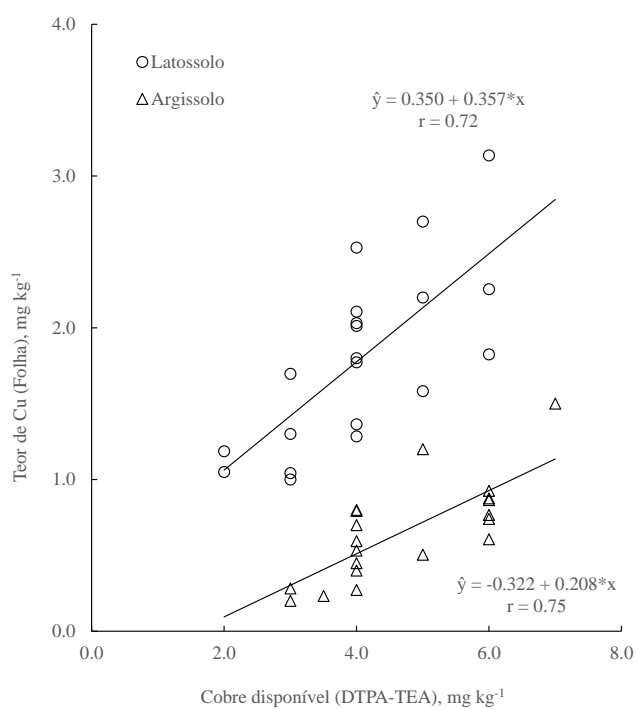
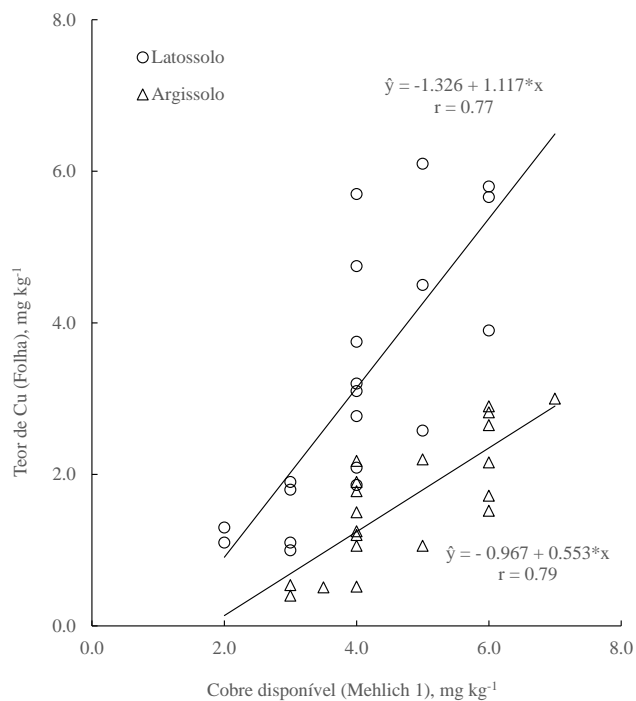


Figura 6 – Relação do teor de cobre (Cu) disponível no solo com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA com do teor total de Cu nas folhas. *Significativo a 5% de probabilidade



4.1.8 Tabelas

Tabela 7 – Componentes de produção da soja em resposta as doses de cobre cultivadas em dois tipos de solos.

Dose de Cu	MST	NV	GV	100 sementes *	Raízes
mg kg ⁻¹	g/vaso	n	n	g	cm
Latossolo					
0	43,4	30,0	2,0	17,1	34,0
1	50,4	34,5	2,0	19,8	41,8
2	51,9	42,5	2,0	15,5	42,3
4	56,8	50,3	2,0	17,1	42,5
8	45,6	41,0	2,0	17,4	51,8
Média	49,6	39,7	2,0	17,4	42,5
Argissolo					
0	39,9	28,3	2,0	16,9	31,5
1	42,0	31,5	2,0	15,4	32,5
2	43,4	35,0	2,0	16,9	35,5
4	49,7	37,5	2,0	16,4	39,3
8	42,4	30,3	2,0	17,0	41,5
Média	43,5	32,5	2,0	16,5	36,1
Média					
0	41,7	31,4	2,0	17,0	32,8
1	46,2	33,0	2,0	17,6	37,2
2	49,4	38,8	2,0	16,2	38,9
4	53,3	43,9	2,0	16,8	40,9
8	44,0	35,6	2,0	17,2	46,7
Média	46,5	36,1	2,0	16,9	39,3
Teste F					
Local	*	*	ns	ns	*
Dose	*	*	ns	ns	*
Local x Dose	ns	ns	ns	ns	ns
CV	11,07	14,51	8,15	13,47	18,20

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 8 – Atributos químicos do solo após o cultivo da soja em respostas as doses de cobre e dois tipos de solo (Latossolo e Argissolo)

Dose de Cu mg kg ⁻¹	pH CaCl ₂	C g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	CTC	S-SO ₄ ²⁻	B	Fe mg kg ⁻¹	Mn	Zn
Latossolo														
0	4,8	24,1	24,6	0,08	3,2	2,0	0,1	6,7	11,8	16,1	0,6	69,4	28,7	9,0
1	4,7	24,4	15,2	0,10	2,5	1,9	0,3	7,2	11,8	18,7	0,9	87,9	26,3	6,3
2	4,6	24,2	15,8	0,09	2,4	1,7	0,3	7,7	11,7	15,8	0,8	79,6	28,2	6,8
4	4,7	24,7	21,1	0,07	2,8	1,8	0,2	7,1	11,7	20,0	0,7	78,2	34,1	8,8
8	4,8	24,0	17,7	0,10	2,7	2,0	0,1	7,0	11,7	18,4	0,7	77,4	29,8	6,9
média	4,7	24,3	18,9	0,09	2,7	1,9	0,2	7,1	11,7	17,8	0,8	78,5	29,4	7,6
Argissolo														
0	6,5	8,1	107,0	0,05	2,5	1,0	0,0	1,8	5,4	13,1	0,3	62,0	25,4	9,1
1	6,5	8,4	108,0	0,05	2,4	1,0	0,0	1,8	5,3	11,2	0,3	70,2	27,9	9,5
2	6,5	8,3	114,7	0,05	2,4	1,0	0,0	1,9	5,2	14,8	0,3	59,9	26,2	9,5
4	6,5	8,7	116,3	0,04	2,4	1,1	0,0	1,9	5,3	19,1	0,3	59,2	26,9	10,1
8	6,6	8,1	113,2	0,05	2,5	1,0	0,0	1,8	5,3	17,6	0,3	68,7	26,4	8,9
média	6,5	8,3	111,8	0,05	2,4	1,0	0,0	1,9	5,3	15,2	0,3	64,0	26,5	9,4
Média														
0	5,7	16,1	65,8	0,07	2,8	1,5	0,0	4,3	8,6	14,6	0,5	65,7	27,0	9,1
1	5,6	16,4	61,6	0,07	2,4	1,5	0,1	4,5	8,5	15,0	0,6	79,0	27,1	7,9
2	5,5	16,2	65,3	0,07	2,4	1,3	0,2	4,8	8,5	15,3	0,6	69,8	27,2	8,2
4	5,6	16,7	68,7	0,06	2,6	1,4	0,1	4,5	8,5	19,6	0,5	68,7	30,5	9,5
8	5,7	16,1	65,4	0,07	2,6	1,5	0,1	4,4	8,5	18,0	0,5	73,0	28,1	7,9
média	5,6	16,3	65,4	0,07	2,6	1,4	0,1	4,5	8,5	16,5	0,5	71,2	28,0	8,5
Teste F														
Solo (S)	*	*	*	*	ns	*	ns	*	*	ns	*	ns	ns	ns
Dose (D)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S x D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	6,67	14,11	13,61	8,99	9,17	8,55	18,21	16,44	15,23	9,95	7,74	15,21	19,37	16,92

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 9 – Teores de cobre disponível nos dois solos com os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA

Doses de Cu mg kg ⁻¹	Cobre disponível no solo (mg kg ⁻¹)					
	Mehlich 1		DTPA-TEA		Média	
	Latossolo	Argissolo	Latossolo	Argissolo	Mehlich 1	DTPA-TEA
0	1,1	0,5	1,1	0,2	0,8	0,7
1	1,9	1,1	1,4	0,5	1,5	0,9
2	2,9	1,8	1,8	0,7	2,3	1,2
4	4,7	2,0	2,5	0,9	3,3	1,7
8	5,8	2,8	2,5	1,0	4,3	1,8
Média	3,3	1,6	1,9	0,7	2,5	1,3
Teste F						
Local		*		*	-	-
Dose		*		*	*	*
Local x Dose		*		*	-	-
CV (%)		14,53		15,44		

Equação de regressão

Dose de Cu vs Cu Disponível (Mehlich 1), Latossolo – $\hat{y} = 1,459+0,580*x$, $R^2 = 0,94$

Dose de Cu vs Cu Disponível (Mehlich 1), Argissolo – $\hat{y} = 0,846+0,266*x$, $R^2 = 0,86$

Dose de Cu vs Cu Disponível (DTPA-TEA), Latossolo – $\hat{y} = 1,269+0,175*x$, $R^2 = 0,74$

Dose de Cu vs Cu Disponível (DTPA-TEA), Argissolo – $\hat{y} = 0,396+0,089*x$, $R^2 = 0,61$

Dose de Cu vs Cu Disponível (Mehlich 1), Média – $\hat{y} = 1,152+0,423*x$, $R^2 = 0,94$

Dose de Cu vs Cu Disponível (DTPA-TEA), Média – $\hat{y} = 0,832+0,132*x$, $R^2 = 0,86$

*Significativo a 5% de probabilidade. DPME – Dose para produção máxima estimada.

Tabela 10 – Teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas de soja em resposta as doses de cobre e o cultivo em dois solos com diferentes teores de matéria orgânica do solo e argila

Doses Cu	N g kg ⁻¹	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	Mg g kg ⁻¹	S g kg ⁻¹	B mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
mg kg ⁻¹											
Latossolo											
0	26,0	1,4	9,5	8,1	3,7	3,2	33,5	2,5	159,5	65,3	52,0
1	28,1	1,5	9,0	5,7	3,9	2,7	38,9	3,5	150,1	73,3	38,3
2	25,2	1,3	8,8	7,9	4,1	2,4	42,0	4,3	135,3	95,0	44,7
4	24,5	1,2	8,5	6,6	3,4	2,3	42,8	4,8	127,3	93,0	37,3
8	20,6	1,3	9,0	5,8	3,4	2,3	44,5	5,3	119,8	76,5	42,8
Média	24,9	1,3	9,0	6,8	3,7	2,6	40,3	4,1	138,4	80,6	43,0
Argissolo											
0	35,8	5,6	11,8	18,0	5,8	2,4	41,6	3,4	160,3	60,5	36,6
1	35,5	5,3	9,8	18,3	4,7	2,3	43,9	4,3	178,0	55,3	27,8
2	36,1	5,5	10,5	16,2	4,4	2,3	43,6	4,5	215,5	41,0	28,0
4	32,1	5,3	7,5	18,2	5,1	2,3	40,6	5,3	172,5	48,3	39,0
8	33,1	3,5	8,0	18,2	5,1	2,4	42,2	6,3	94,3	31,3	30,0
Média	34,5	5,0	9,5	17,8	5,0	2,3	42,4	4,7	164,1	47,3	32,3
Média											
0	30,9	3,5	10,7	13,0	4,7	2,8	37,6	3,0	159,9	62,9	44,3
1	31,8	3,4	9,4	12,0	4,3	2,5	41,4	3,9	164,1	64,3	33,0
2	30,6	3,4	9,6	12,0	4,3	2,3	42,8	4,4	175,4	68,0	36,4
4	28,3	3,2	8,0	12,4	4,2	2,3	41,7	5,1	149,9	70,6	38,1
8	26,9	2,4	8,5	12,0	4,3	2,4	43,4	5,8	107,0	53,9	36,4
Média	29,7	3,2	9,2	12,3	4,3	2,5	41,4	4,4	151,2	63,9	37,6
Teste F											
Solo (S)	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	ns	*	*
Dose (D)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
S x D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
CV (%)	8,81	11,63	14,96	13,10	9,55	6,77	12,10	14,19	16,98	17,23	11,34

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 11 – Teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos de soja em resposta as doses de cobre e o cultivo em dois solos com diferentes teores de matéria orgânica do solo e argila

Doses	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Cu	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
mg kg ⁻¹											
Latossolo											
0	61,7	5,1	18,5	3,3	3,1	3,0	34,3	8,9	79,8	38,7	46,9
1	62,5	5,3	19,7	3,6	3,3	3,1	34,7	7,2	82,3	45,1	47,7
2	59,5	4,0	19,0	3,0	2,7	2,6	36,8	5,7	67,3	53,0	42,4
4	60,7	4,3	18,0	2,8	2,8	3,1	36,6	6,8	68,1	41,8	46,1
8	60,9	5,3	19,1	3,2	3,1	3,4	34,6	9,2	81,6	44,2	47,1
Média	61,1	4,8	18,9	3,2	3,0	3,1	35,4	7,5	75,8	44,5	46,0
Argissolo											
0	59,5	7,3	18,6	3,5	3,0	3,3	37,7	5,7	116,3	27,8	47,5
1	61,1	7,0	18,3	3,2	2,9	3,5	30,7	5,7	91,2	24,8	38,7
2	61,1	8,3	19,1	3,4	3,0	3,0	34,8	5,7	97,4	32,8	37,9
4	60,7	6,8	19,4	3,4	3,0	3,0	31,2	5,9	82,5	23,9	41,0
8	60,9	7,1	18,9	3,4	2,9	3,5	30,9	6,2	86,7	30,2	40,7
Média	60,7	7,3	18,8	3,4	3,0	3,3	33,1	5,8	94,8	27,9	41,2
Média											
0	60,6	6,2	18,6	3,4	3,1	3,1	36,0	7,3	98,0	33,2	47,2
1	61,8	6,1	19,0	3,4	3,1	3,3	32,7	6,4	86,7	35,0	43,2
2	60,3	6,2	19,0	3,2	2,9	2,8	35,8	5,7	82,3	42,9	40,2
4	60,7	5,6	18,7	3,1	2,9	3,1	33,9	6,3	75,3	32,8	43,6
8	60,9	6,2	19,0	3,3	3,0	3,5	32,8	7,7	84,1	37,2	43,9
Média	60,9	6,1	18,9	3,3	3,0	3,2	34,2	6,7	85,3	36,2	43,6
Teste F											
Solo (S)	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
Dose (D)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
S x D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	11,43	8,96	12,15	13,44	15,96	14,44	21,11	17,42	18,99	12,44	17,53

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 12 – Taxa fotossintética (A), concentração intercelular de CO₂ (C_i), condutância estomática (G_s), taxa transpiratória (T_{mmol}), eficiência intrínseca de uso de água (EI_{UH₂O}) e teor de clorofila na soja cultivada em dois tipos de solo (Latosolo e Argissolo) e doses de cobre

Doses de Cu	A □ mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	C _i mol m ⁻² s ⁻¹	G _s □ mol mol ⁻¹	T _{mmol} □ mol m ⁻² s ⁻¹	EI _{UH₂O} □ mol m ⁻² s ⁻¹	Clorofila mg m ⁻²
mg kg ⁻¹						
Latosolo						
0	15,85	275,25	0,34	3,32	4,90	331,44
1	16,41	288,00	0,20	3,63	4,55	296,87
2	18,20	301,00	0,41	4,10	4,47	315,81
4	15,99	283,00	0,20	3,57	4,48	297,63
8	14,51	261,75	0,29	3,00	5,05	317,33
Média	16,19	281,80	0,29	3,52	4,69	311,82
Argissolo						
0	20,09	313,13	0,54	3,33	6,04	312,31
1	20,85	318,63	0,60	3,36	6,23	311,65
2	22,14	310,50	0,35	4,15	5,37	301,23
4	22,11	327,25	0,57	2,99	7,39	323,86
8	19,72	342,75	0,64	3,12	6,37	310,70
Média	20,98	322,45	0,54	3,39	6,28	311,95
Média						
0	17,97	294,19	0,44	3,33	5,47	321,88
1	18,63	303,15	0,40	3,50	5,39	304,26
2	20,17	305,75	0,38	4,12	4,92	308,52
4	19,05	305,12	0,39	3,28	5,94	310,75
8	17,11	302,25	0,47	3,06	5,71	314,01
Média	18,59	302,13	0,41	3,46	5,49	311,88
Teste F						
Solo (S)	*	*	ns	ns	*	ns
Dose (D)	*	*	ns	*	ns	ns
S × D	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)						

* e ^{NS} Significativo e não significativo, respectivamente a 5% de probabilidade pelo teste F.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Com os dois experimentos sobre a dinâmica do Cu no solo foram possíveis chegar as seguintes conclusões:

- O aumento do teor de matéria orgânica do solo aumento a faixa de nível crítico de cobre (Cu) no solo para o cultivo da soja e trigo;
- Ambas as culturas (soja e trigo) apresentaram respostas positivas a aplicação de Cu, com a máxima produção estimada obtida com a dose próxima a 4,0 kg ha⁻¹ do nutriente;
- Altos teores de MOS no solo minimiza as interações do Cu na concentração e absorção de outros nutrientes no solo e na planta;
- O incremento do nível de Cu no solo em SPD e solos com diferentes teores de MOS e argila aumenta a taxa fotossintética (A) e teor de clorofila na planta e as duas variáveis apresentam correlação significativa com a produção de grãos de soja, enquanto no SPD com a produção de trigo;
- Em SPD, o número de vagens por plantas (NVP) na soja e altura de plantas (H) são indicativos dos efeitos positivos ou negativos da aplicação de Cu no solo;
- As doses de Cu no solo acarretam em incremento de forma linear até 8 mg kg⁻¹ no volume de raízes na planta de soja;
- Mesmo com adubação semelhante, o tipo de solo é a variável mais importante para definir a disponibilidade de nutriente no solo;
- Independentemente da quantidade de MOS e teor de argila no solo, a aplicação de até 4 mg kg⁻¹ de Cu aumenta a produção de grãos da soja;
- Os extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA nas diferentes condições estudadas apresentaram correlação entre si e foram eficientes na determinação do Cu disponível no solo.

REFERÊNCIAS

- ABITRIGO. 2016. Associação Brasileira da Indústria do Trigo. Disponível em: <<http://abitrito.com.br/estatisticas.php>>. Acesso em: setembro 2016.
- Abreu, C.A., A. S. Lopes, and D. S. Andrade. 1987. Identification of micronutrients deficiencies in five lowland soils from the Cerrado region of Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 22:833–841.
- Adriano, D. C. 2001. *Trace Elements in Terrestrial Environments*, Springer Verlag, New York/Berlin/Heidelberg.
- Alaoui-Sossé, B., P. Genet, F. Vinit-Dunand, M. L. Toussaint, D. Epron, and P. M. Badot. 2004. Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents. *Plant Science*, 166:1213–1218.
- Alcacio, T. E., D. Hesterberg, J. W. Chou, J. D. Martin, S. Beauchemin, and D. E. Sayers. 2001. Molecular scale characteristics of Cu(II) bonding in goethite–humate complexes. *Geochimica Cosmochimica Acta Journal*, 65:1355–1366.
- Allen, S. E., G. L. Terman, and L. B. Clements. 1976. *Greenhouse techniques for soil-plant fertilizer research*. Muscle Shoals, USA: Tennessee Valley Authority.
- Alloway, B. J. 2013. Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy Metals in Soils Environmental Pollution*, pp.11–50, ed. B. J. Alloway. Springer: Dordrecht, Netherlands.
- Alvarez Venegas, V. H., R. F. Novais, N. F. Barros, R. B. Cantarutti, and A.S. Lopes. 1999. Interpretation of soil analysis results. In: *Recommendation for the use of lime and fertilizers in Minas Gerais State*. pp.25–32, eds. Ribeiro, A. C., P. T. Guimarães, and V. H. Alvarez Venegas. Viçosa, Brazil: CFSEMG.
- Andrés-Colás, N.; A. Perea-García, S. M. De Andrés, A. Garcia-Molina, E. Dorcey, S. Rodríguez-Navarro, M. A. Pérez-Amador, S. Puiga, and L. Peñarrubia. 2013. Comparison of global responses to mild deficiency and excess copper levels in *Arabidopsis* seedlings. *Metallomics*, 5:1234–1246.
- Azar, G. S., A. S. F. Araújo, M.E. Oliveira, and D. M. M. R. Azevedo. 2013. Biomassa e atividade microbiana do solo sob pastagem em sistemas de monocultura e silvipastoril. *Semina: Ciências Agrárias*, 34:2727–2736.
- Balesdent, J., C. Chenu, and M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53:215–230.
- Balesdent, J., C. Chenu, and M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage & Research*, 53:215–230.
- Bataglia, O.C., and B. van Raij. Efficiency of micronutrients extractants in soil analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 13:205–212.

- Bayer C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, and A. Pavinato. 2004. Carbon storage in labile fractions of soil organic matter in a tropical no-tillage Oxisol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:677–683.
- Bayer, C. 1996. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejo de solos. 241f. Tese (doutorado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, Brasil.
- Bonfil, D. J., I. Mufradi, S. Klitman, and S. Asido. 1999. Wheat grain yield and soil profile water distribution in a no-till and environment. *Agronomy Journal*, 91:368–373.
- Borkert, C. M., C. A. Gaudêncio, J. E. Pereira, L. R. Pereira, and A. Oliveira Junior, A. 2003. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 28:423–455.
- Bradl, H. B. 2004. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277:1–18.
- Brandt, E. A.; L. C. F.; Souza, A.C. T. Vitorino, and M.E. Marchetti. 2006. Desempenho agrônomo de soja em função da sucessão de culturas em sistema plantio direto. *Ciência e Agrotecnologia*, 30:869–874.
- Brown, J. C., and C. D. Foy. 1964. Effect of Cu on the distribution of P, Ca, and Fe in barley plants. *Soil Science*, 98:362–370.
- Burkhead, J. L., K. A. Gogolin Reynolds, S. E. Abdel-Ghany, C. M. Cohu, and M. Pilon. 2009. Copper homeostasis. *New Phytologist*, 182:799–816.
- Caires, E. F., L. R. F. Alleoni, M. A. Cambri, and G. Barth. 2005. Surface Application of Lime for Crop Grain Production under a No-Till System *Agronomy Journal*, 97:791–798.
- Carr, H. S. and D. R. Winge. 2003. Assembly of cytochrome c oxidase within the mitochondrion. *Accounts of Chemistry Research*, 36:30–316.
- Carvalho, M. A. C., M. L. F. Athayde, R. P. Soratto, M. C. Alves, O. Arf. 2004. Soja em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional em solo de Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:1141–1148.
- Castro, P. R. C., and R. A. Klugue, R. A. 1999. *Ecofisiologia de cultivos anuais*. Editora Nobel: São Paulo, Brasil.
- Cavaliere, K. M. V., C. A. Tormena, J. Fidalski, J. C. Pintro, A. C. S. Costa, and I. G. Souza Junior. 2004. Alterações nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho eutroférrico por dois sistemas de manejo de solo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 26:377-385.
- Chevallier, T., E. Blanchart, A. Albrecht, and C Feller. 2004. The physical protection of soil organic carbon in aggregates: A mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies). *Agricultural Ecosystem and Environment*, 103:375–387.

Christensen, B. T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, 20:1–90.

CONAB. 2016 *Companhia Nacional de Abastecimento*. Acompanhamento da safra brasileira de grãos s, v. 3 - Safra 2015/16. CONAB: Brasília, Brasil.

Corrêa, J. C., M. Mauad, C. A. Rosolem. 2004. Phosphorus in soil and soybean growth as affected by phosphate fertilization and cover crop residues. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:1231–1237.

Del Pozo, T., V. Cambiazo, and M. González. 2010. Gene expression profiling analysis of copper homeostasis in *Arabidopsis thaliana*. *Biochemical and Biophysical Research Communication*, 393:248–252.

Diekow, J., J. Mielniczuk, H. Knicker, C. Bayer, D. P. Dick, and I. Kögel-Knabner, I. 2005. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. *Plant Soil*, 268:319–328.

Doran, J. W. and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In *Defining soil quality for a sustainable environment*, pp.3–22, ed. J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart. Soil Science Society of America, Madison, 1994.

Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In *Defining soil quality for a sustainable environment*, pp.1–20, eds. J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart. ASA, SSSA: Madison, USA.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 1997. *Manual of soil analysis methods*. 2nd ed. National Soil Research Center: Rio de Janeiro, Brazil.

Fageria N. K. 2009. *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press: New York, USA.

Fageria, N. K., L. F. Stone, and A. Moreira. 2008. Liming and manganese influence on common bean yield, nutrient uptake and changes in soil chemical properties of an Oxisol under no-tillage system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31:1723–1755.

Fageria, N. K., L. F. Stone, and L. C. Melo. 2015. Copper-use efficiency in dry bean genotypes, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46:979–990.

Fageria, N. K., V. C. Baligar. 2014. Evaluation of tropical legume cover crops for copper use efficiency. *American Journal of Plant Sciences*, 5:1236-1247.

Fageria, N. K., V. C. Baligar, A. Moreira, and T. A. Portes. 2010. Dry bean genotypes evaluation for growth, yield components and phosphorus use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 33:2167–2181.

Fehr, W. R., C. E. Caviness, D. T. Burmood, and J. S. Pennington. 1971. Stage of development description for soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Crop Science* 11:929–931.

Festa, R. A., and D. J. Thiele. 2011. Copper: An essential metal in biology. *Current Biology*, 21:R877–R883.

Franchini, J. C., C. C. Crispino, R. A. Souza, E. Torres, and M. Hungria. 2007. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 92:18–29.

Fritschi F. B., and J. D. Ray. 2007. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll a/b ratio. *Photosynthetica* 45:92–98.

Galantini, J. A., M. R. Landriscini, J. O. Iglesias, A. M. Miglierina, and R. A. Rossell. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil & Tillage Research*, 53:137–144.

Galvão, E.Z. 1991. Effect of micronutrients and cobalt on yield and chemical composition of rice, maize and soybean in Cerrado soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 8:111–116.

Galvão, E.Z. 1999. Methods of copper application and evaluation of its availability for soybean grown on a Cerrado Red Yellow Latosol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23: 265–272.

Garnett, T.P., and R.D. Graham. 2005. Distribution and remobilization of iron and copper in wheat. *Annals of Botany*, 95:817–826.

Gregorich, E. G., M. R. Carter, D. A. Angers, C. M. Monreal, and B. H. Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 13:367–375.

Guareschi, R. F., M. G. Pereira, and A. Perin. 2013. Frações da matéria orgânica em áreas de Latossolo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado do estado de Goiás. *Semina: Ciências Agrárias*, 34:2615–2628.

Gutkoski, L. C., B. Klein, F. A. Pagnussatt, and I. Pedó. 2007. Características tecnológicas de genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivados no Cerrado. *Ciência e Agrotecnologia*, 31:786–792.

Hänsch, R., and R. R. Mendel. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 12:259–266.

Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers*. 7th ed. Pearson Education, Upper Saddle River.

Hicks, C. R. 1973. *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*. New York, USA: Holt, Rinehart and Winston.

Hirakuri, M. H., and J. J. Lazzarotto. 2014. *O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro*. Embrapa Soja: Londrina, Brasil.

Igue, K., M. Alcover, R. Derpsch, M. A. Pavan, S. C. Mella, and G. B. Medeiros. 1984. *Adubo orgânico; adubo verde; residuo industrial; composto orgânico; biofertilizante; adubação*. Instituto Agronômico do Paraná: Londrina, Brazil.

ITTT. 2013. *Informações técnicas para o trigo e triticale, safra 2013*. IAPAR: Londrina, Brazil.

Janzen, H. H.; C. A. Campbell, E. G. Gregorich, and B. H. Ellert. 1998. Soil carbon dynamics in Canadian agroecosystems. In *Soil processes and the C cycle*, pp.57–80, eds. R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, and B. A. Stewart, CRC Press: Boca Raton, USA.

Lal, R. 1986. Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. *Advances in Soil Science*, 5:1–109.

Lindsay, W. L., and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42:421–428.

Liu, R., B. Goodell, J. Jellison, and A. Amiorbahman. 2015. Electrochemical study of 2,3-dihydroxybenzoic acid and its interaction with Cu(II) an H₂O₂ in aqueous solutions: Implications for wood decay. *Environmental Science and Technology*, 39:175-180.

Loué, A. 1993. *Micronutrients in Agriculture* [Oligoéléments em agriculture]. Antibes, FR: SCPA-NATHAN.

Makarim, A.K., and F.R. Cox. 1983. Evaluation of the need for copper with several soil extractants. *Agronomy Journal*, 75:493–496.

Malavolta, E. 2006. *Manual de nutrição mineral de plantas*. Piracicaba, Brazil: Agronômica Ceres.

Malavolta, E., G. C. Vitti, and S. A. Oliveira. 1997. *Evaluation of Nutritional Status of Plants; principles and application* [Avaliação do Estado Nutricional das Plantas; princípios e aplicações]. Piracicaba, Brazil: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.

MAPA, *Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento*. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/trigo>>. Acesso em: abril 2018.

Marschner, H. and V. Römheld. 1994. Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and Soil*, 165:261-274.

Marschner, P. 2012. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. London, UK: Academic Press.

Martens, J. R. T., J. W. Hoepfner, and M. H. Entz. 2001. Legume cover crops with winter cereals in southern Manitoba: establishment, productivity, and microclimate effects. *Agronomy Journal*, 93:1086–1096.

- Masuda, T. and P. D. Goldsmith. 2009. World Soybean Production: area harvested, yield, and long-term projections. *International Food and Agribusiness Management Review*, 12:233–255.
- McBride, M. B., S. Sauvé, and W. Hendershot. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 48:1365–1389.
- McGrath, S. P., J. R. Sanders, and M. H. Shalaby. 1998. The effects of soil organic matter levels on soil solution concentrations and extractabilities of manganese, zinc and copper. *Geoderma*, 42:177–188.
- Mendonça, E. S. 1995. Organic matter oxidation and its relation with different forms of aluminum in Latosol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 19:25–30.
- Mielniczuk, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*, pp. 1–8, eds. G. A. Santos, and F. A. O. Camargo. Genesis: Porto Alegre, Brasil.
- Migocka, M. and K. Malas, 2018. Plant responses to copper: molecular and regulatory mechanisms of copper uptake, distribution and accumulation in plants. In *Plant Micronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*, pp. 71–86, ed. M. A. Hossain, T. Kamiya, D. J. Burrit, L. S. P. Tran, and Toru Fujiwara. London: Elsevier.
- Moreira, A., and L. A. C. Moraes. 2016. Sulfur use efficiency in soybean cultivars adapted to tropical and subtropical conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47:2208–2217.
- Moreira, A., L. A. C. Moraes, and N. K. Fageria. 2015. Variability on yield, nutritional status, soil fertility, and potassium-use efficiency by soybean cultivar in acidic soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46:2490–2508.
- Moreira, A., L. A. C. Moraes, G. Schroth, and J. M. G. Mandarino. 2015. Effect of nitrogen, row spacing, and plant density on yield, yield components, and plant physiology in soybean-wheat intercropping. *Agronomy Jorunal*, 107:2162–2170.
- Moreira, A., L. A. C. Moraes, L. G. M. Souza, and I. P. Bruno. 2016a. Bioavailability of nutrients in seeds from tropical and subtropical soybean varieties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47:888–898.
- Moreira, A., L. A. C. Moraes, T. Furlan, P. Cerezini, and I. P. Bruno. 2016b. Interaction of glyphosate with zinc for the yield, photosynthesis, soil fertility and nutritional status of soybean. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47:706–719.
- Moreira, A., N. K. Fageria, and A. Garcia y Garcia. 2011. Effect of liming on the nutritional conditions and yield of alfalfa grown in tropical conditions. *Journal of Plant Nutrition* 34:1107–1119.
- Nascimento, J. T., I. F. Silva, R. D. Santiago, and L. F. Silva Neto. 2003. Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, 7:457–462.

Navarrete, J. U., D. M. Borrok, M. Viveros, and J. T. Ellzey. 2011. Copper isotope fractionation during surface adsorption and intracellular incorporation by bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75:784–799.

Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1972. A simple digestion procedure for estimation of total nitrogen in soils and sediments. *Journal of Environmental Quality*, 1:423–425

Nogueira, O. P. A., T. Sedyama, B. H. Barros, and C. R. Teixeira. 2009. Morfologia, crescimento e desenvolvimento. In *Tecnologias de produção e usos da soja*, pp.7–16, ed. T. Sedyama. Macenas: Londrina, Brasil.

Novozamsky, I., V. J. G. Houba, R. van Eck, and W. van Vark. 1983. A novel digestion technique for multi-element plant analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 14:239–248.

Oades, J. M. 1995. An overview of processes affecting the cycling of organic carbon in soils. In *Role of non-living organic matter in the earth's carbon cycle*, pp.55–94. R. G. Zepp, and C. Sonntag John Wiley: New York, USA.

Osório, E A. 1992. *A cultura do trigo*. Globo: São Paulo.

Parveen, I., M. D. Threadgill, J. M. Moorby, and A. Winters. 2010. Oxidative phenols in forage crops containing polyphenol oxidase enzymes. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 58:1371–1382.

Passos, R. R., H. A. Ruiz, R. B. Cantarutti, and E. S. Mendonça. 2007. Carbono orgânico e Nitrogênio em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:1109–1118.

Pimentel-Gomes, F. 1990. *Experimental Statistics Course*. Nobel: Piracicaba, Brazil.

Printz, B., S. Lutts, J. F. Hausman, and K. Sergeant. 2016. Copper trafficking in plants and its implication on cell wall dynamics. *Frontiers in Plant Science*, 7:1–16.

Puig, S., N. Andrés-Colás, A. García-Molina, and L. Peñarrubia. 2007. Copper and iron homeostasis in *Arabidopsis*: responses to metal deficiencies, interactions and biotechnological applications. *Plant, Cell and Environment*, 30:271–290.

Reichert, J. M., J. A. Albuquerque, P. I. Gubiani, D. R. Kaiser, J. P. Minella, and D. J. Reinert. 2011. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In *Tópicos em Ciência do Solo*, pp.1–54, eds. O. Klauberg Filho, A. L. Mafra, and L. C. Gatiboni, SBCS: Viçosa, Brasil.

Ridge, P., Y. Zhang, and V. Gladyshev. 2008. Comparative genomic analyses of copper transporters and cuproproteomes reveal evolutionary dynamics of copper utilization and its link to oxygen. *PLoS ONE*, 3:e1378.

Robinson, N. J., C. M. Procter, E. L. Connoly, and M. L. Guerinot. 1999. A ferric-chelate reductase for iron uptake from soils. *Nature*, 397:694–697.

Rodrigo-Moreno A., N. Andrés-Colás, C. Poschenrieder, B. Gunsé, L. Peñarrubia, and S. Shabala. 2013. Calcium- and potassium-permeable plasma membrane transporters are activated by copper in *Arabidopsis* root tips: linking copper transport with cytosolic hydroxyl radical production. *Plant Cell Environment*, 36:844–855

Rodrigues, O. 2000. Manejo de trigo: bases ecofisiológicas. In *Tecnologia para produzir trigo no Rio Grande do Sul*, pp.120–155, eds G. R. Cunha, and B. Bacaltchuk, Embrapa Trigo: Passo Fundo, Brasil.

Roman, E. R., and J. A. R. O. Velloso. 1993. Controle cultural, coberturas mortas e alelopatia em sistemas conservacionistas. In *Plantio direto no Brasil*, pp.77–84, ed. EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. EMBRAPA-CNPT: Passo Fundo, Brasil.

Santos, H. P. and J. C. B. Lhamby. 2001. Influência de culturas de inverno sobre o rendimento de grãos de soja cultivada em sistemas de rotação de culturas. *Ciência Rural*, 31:1–6.

Santos, N. Z., J. Dieckow, C. Bayer, R. Molin, N. Favaretto, V. Pauletti, and J. T. Piva. 2011. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil Tillage & Research*, 111:208–218.

Sargentini Junior, E., J. C. Rocha, A. H. Rosa, L. F. Zara, and A. Santos. 2001. Substâncias húmicas aquáticas: fracionamento molecular e caracterização de rearranjos internos após complexação com íons metálicos. *Química Nova*, 24:339-344.

Sediyama, T., R. C. Teixeira, and H. B. Barros. 2009. Origem, Evolução e Importância Econômica. In *Tecnologias de produção e usos da soja*, pp.23–44, ed. T. Sediyama, T. Macenas: Londrina, Brasil.

Silva, I. R., and E. Sá Mendonça. 2007. Matéria orgânica do solo. In *Fertilidade do Solo*, pp.257–374, Ed. R. F. Novais. SBCS: Viçosa, Brasil.

Silva, J. E., J. Lemainski, and D. V. S. Resck. 1994. Soil organic matter losses and their relationships with cation exchange. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18:541–547.

Silva, J. E., J. Lemainski, D. V. S. Resck. 1994. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18:541–547.

Sisti, C. P. J., H. P. Santos, R. Kohhann, B. J. R. Alves, S. Urquiaga, and R. M. Boddey. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage & Research*, 76:39–58.

Six, J., C. Feller, K. Denef, S. M. Ogle, and M. J. C. Sá. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. *Agronomie*, 22:755–775.

- Six, J., E. T. Elliott, and K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology Biochemistry*, 32:2099–2103.
- Sodré, F. F., E. Lenzi, A. C. S Costa. 2001. Applicability of adsorption models to the study of copper behavior in clayey soils. *Química Nova*, 3:324–330.
- Souza J. A., M. M. J. Fratoni, L. A. C. Moraes, and A. Moreira. 2018. Boron and amino acids foliar application on wheat-soybean intercropping in a non-tillage system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49:1–22.
- Souza, E. D., M. A. C. Carneiro, and V. L. Banys. 2008. Fitomassa e acúmulo de nitrogênio, em espécies vegetais de cobertura do solo para um Latossolo Vermelho distroférico de Cerrado. *Acta Scientiarum Agronomy*, 30:525–531.
- Stevenson, F. J., and A. Fitch. 1981. Reactions with organic matter. In *Copper in Soils and Plants*, pp.69–95, eds. J. F. Loneragan, A. D. Robson, and R. D. Graham. Sidney, AUS: Academic Press.
- TPS. 2013. *Tecnologia de Produção de Soja – Região Central do Brasil 2012 e 2013*. Embrapa Soja: Londrina, Brazil.
- Uddling, J., J. Gelang-Alfredsson, K. Piikki, and H. Pleijel. 2007. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthetic Research*, 91:37–46.
- Urano, E. O. M., C. H. Kurihara, S. Maeda, A. C. T. Vitorino, M. C. Gonçalves, M. E. Marchetti. 2006. Soybean nutritional status evaluation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:1421–1428.
- Urchei, M. A., J. D. Rodrigues, and L. F. STONE. 2000. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35:497–506.
- USDA. 2018. Oilseeds: *World Markets and Trade USDA Foreign Agricultural Service*. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2018.
- Walsh, L. M., W. H. Erhardt, and H. D. Seibel. 1972. Copper toxicity in Snapbeans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal Environment Quality*, 1:197–200.
- Walters, D. 2003. Resistance to plant pathogens: possible roles for free polyamines and polyamine catabolism. *New Phytologist*, 159:109–115.
- Waters, B. M., and L. C. Armbrust. 2013. Optimal copper supply is required for normal plant iron deficiency responses. *Plant Signaling & Behavior* 8:e26611-1–e26611-5.
- Wu. J., D.A. Laird, and M. L. Thompson. 1999. Sorption and desorption of Cu on soil clay component. *Journal of Environmental Quality*, 28:334–338.
- Yruela, I. 2005. Copper in Plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17:145–156.

Yu, Q. and Z. Rengel. 1999. Micronutrient deficiency influences plant growth and activities of superoxide dismutases in narrowleafed *Lupins*. *Annals of Botany*, 83:175–182.

Yuan, H. N., H. H. Xu, W. C. Liu, Y. T. Lu. 2013. Copper regulates primary root elongation through PIN1 mediated auxin redistribution. *Plant Cell Physiology*, 54:766–778.

Yuan, M., S. Wang, Z. Chu, X. Li, and C. Xu. 2010. The bacterial pathogen *Xanthomonas oryzae* overcomes rice defenses by regulating host copper redistribution. *Plant Cell*, 22:3164–3176.

Yurela, I. 2009. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 36:409–430.

Zhao, Q., J. Nakashima, F. Chen, Y. Yin, C. Fu, J. Yun, H. Shao, X. Wang, Z. Y. Wang, and R. Dixon. 2013. Laccase is necessary and nonredundant with Peroxidase for lignin polymerization during vascular development in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 25:3976–3987.