

GUSTAVO ALVES SANTOS

FORMAS DE ADIÇÃO DE MICRONUTRIENTES A UM FORMULADO NPK E
SEU EFEITO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO MILHO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-
graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração
em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer

Co-orientador

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

GUSTAVO ALVES SANTOS

FORMAS DE ADIÇÃO DE MICRONUTRIENTES A UM FORMULADO NPK E
SEU EFEITO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO MILHO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-
graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração
em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 18 de fevereiro de 2013.

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira
(Co-orientador)

UFU

Dra. Lilian Aparecida Oliveira

UFU

Dra. Anelisa de Aquino Vidal

APTA

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer
ICIAG-UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo, pela oportunidade e por todas as bênçãos;

A minha mãe, Sebastiana, ao meu pai, Sílvio, e ao meu irmão, Murilo, pelo amor incondicional e pelo apoio constante;

A toda a minha família pelo incentivo e pela motivação;

A minha namorada, Gabriela, por todo o carinho e pela companhia tão prazerosa;

Aos professores Gaspar e Hamilton pelo aprendizado, confiança e orientação;

A todos do Laboratório de Tecnologia de Fertilizantes, “LAFER”, e também a todos os membros do Grupo de Pesquisa sobre Silício na Agricultura, pelo auxílio e pelo companheirismo;

Aos técnicos do Laboratório de Análises de Solo “LABAS” pela ajuda imensurável;

Aos colegas de sala pelo tempo proveitoso de convívio, estudo e diversão;

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMO | i |
| ABSTRACT | ii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1. Micronutrientes na nutrição mineral de plantas | 3 |
| 2.1.1. Importância | 3 |
| 2.1.2. Boro | 3 |
| 2.1.3. Cobre | 4 |
| 2.1.4. Manganês | 5 |
| 2.1.5. Zinco | 6 |
| 2.1.6. Micronutrientes na cultura do milho | 6 |
| 2.2. Dinâmica e formas dos micronutrientes no solo | 9 |
| 2.2.1. Boro | 9 |
| 2.2.2. Cobre | 11 |
| 2.2.3. Manganês | 11 |
| 2.2.4. Zinco | 12 |
| 2.3. Adubação com micronutrientes | 13 |
| 2.3.1. Importância | 13 |
| 2.3.2. Formas de Aplicação | 15 |
| 2.3.3. Fontes de Micronutrientes | 15 |
| 2.3.3.1. Óxidos | 16 |
| 2.3.3.2. Fertilizantes NPK contendo micronutrientes | 17 |
| 2.3.3.2.1. Mistura de micronutrientes com grânulos NPK | 19 |
| 2.3.3.2.2. Micronutrientes no revestimento de fertilizantes NPK | 20 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 22 |
| 3.1. Caracterização dos fertilizantes | 22 |
| 3.2. Delineamento | 22 |
| 3.3. Experimento 1 | 23 |
| 3.3.1. Instalação | 23 |
| 3.3.2. Condução | 24 |
| 3.4. Experimento 2 | 25 |

| | |
|--|----|
| 3.4.1. Instalação | 25 |
| 3.4.2. Condução | 25 |
| 3.5. Avaliações | 26 |
| 3.6. Análises estatísticas | 26 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 4.1 Experimento 1 | 27 |
| 4.1.1 Teores de micronutrientes no solo | 27 |
| 4.1.1.1 Boro | 27 |
| 4.1.1.2 Cobre | 28 |
| 4.1.1.3 Manganês | 29 |
| 4.1.1.4 Zinco | 30 |
| 4.1.2 Massa seca | 32 |
| 4.1.3 Concentração e acúmulo de micronutrientes na parte aérea | 34 |
| 4.1.3.1 Boro | 34 |
| 4.1.3.2 Cobre | 36 |
| 4.1.3.3 Manganês | 37 |
| 4.1.3.4 Zinco | 38 |
| 4.1.4 Correlação entre os teores de micronutrientes no solo e o acumulado na parte aérea | 40 |
| 4.2 Experimento 2 | 42 |
| 4.2.1 Teores de micronutrientes no solo | 42 |
| 4.2.1.1 Boro | 42 |
| 4.2.1.2 Cobre | 43 |
| 4.2.1.3 Manganês | 44 |
| 4.2.1.4 Zinco | 45 |
| 4.2.2 Massa seca | 47 |
| 4.2.3 Concentração e acúmulo de micronutrientes na parte aérea | 49 |
| 4.2.3.1 Boro | 49 |
| 4.2.3.2 Cobre | 53 |
| 4.2.3.3 Manganês | 56 |
| 4.2.3.4 Zinco | 58 |
| 4.2.4 Correlação entre os teores de micronutrientes no solo e o acumulado na parte aérea | 61 |
| 5. CONCLUSÕES | 63 |

| | |
|----------------------------|----|
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 64 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |

RESUMO

SANTOS, GUSTAVO ALVES. **Formas de adição de micronutrientes a um formulado NPK e seu efeito sobre o desenvolvimento do milho.** 2013. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.¹

Os micronutrientes são exigidos em quantidades pequenas pelas plantas e são essenciais ao seu desenvolvimento, porém seus teores no solo, muitas vezes, não são suficientes para garantir altas produtividades, o que gera a necessidade de sua aplicação por meio de fertilizantes. O objetivo do trabalho foi comparar a disponibilização dos micronutrientes boro, cobre, manganês e zinco para o solo, sua absorção, acúmulo e efeito no desenvolvimento de plantas de milho, quando provenientes de uma mistura física de grânulos NPK e micronutrientes e de uma mistura granulada NPK revestida com esses micronutrientes. Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, sendo um em Latossolo Vermelho distrófico típico e o híbrido de milho AG1051, e outro em Latossolo Vermelho Acriférico típico e o híbrido de milho DKB 390 VTPRO. A fórmula utilizada foi o 04-30-10 (N-P₂O₅-K₂O) com 0,1% B, 0,2% Cu, 0,2% Mn e 0,3% Zn. Em ambos os experimentos, utilizou-se delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições e as doses utilizadas das formulações NPK foram 0, 150, 300, 600, 1200 e 2400 kg ha⁻¹. Para que todos os tratamentos recebessem a mesma quantidade de NPK doses complementares de 04-30-10 sem micronutrientes foram aplicadas de modo que todos os tratamentos recebessem o equivalente a 2400 kg ha⁻¹ do formulado e, portanto as mesmas doses de nitrogênio, fósforo e potássio, variando somente as doses dos micronutrientes. O revestimento dos grânulos de NPK com micronutrientes foi superior à mistura física de micronutrientes granulados com o NPK quando se comparou a concentração de zinco no solo, havendo também incrementos nos teores de boro e maior disponibilização de cobre. A produção de massa seca da parte aérea do milho foi maior quando o fertilizante NPK recebeu revestimento com micronutrientes. Também o acúmulo de boro, manganês, cobre e zinco na parte aérea das plantas de milho foi superior quando os grânulos do adubo NPK foram revestidos.

Palavras-chave: boro; cobre; manganês; zinco; mistura de grânulos; revestimento de grânulos.

¹ Comitê Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Orientador) e Hamilton Seron Pereira – UFU (Co-orientador).

ABSTRACT

SANTOS, GUSTAVO ALVES. **Methods of adding micronutrients to a NPK formulation and its effect on maize development.** 2013. 65 p. Dissertation (MSc in Agronomy / Soils) - Federal University of Uberlândia.¹

Micronutrients are required in small amounts by plants and are essential for their development; however, micronutrient content in soil often is not sufficient to ensure high productivity, which creates the need for its application through fertilizers. This study compared availability of boron, copper, manganese and zinc to the soil, their absorption, accumulation and effect in developing maize plants, supplied from a physical mixture of NPK granules and micronutrients or from a granulated mixture NPK coated with these micronutrients. Two experiments were conducted in a greenhouse, one with Oxisol soil and AG1051 corn hybrid for the first experiment and the other with an Ustox typical soil and DKB 390 VTPRO corn hybrid used in the second experiment. The formulation used was 04-30-10 (N-P₂O₅-K₂O) with 0.1% B, 0.2% Cu, 0.2% Mn and 0.3% Zn. In both experiments, a randomized block design with four replicates were used and the formula NPK doses used were 0, 150, 300, 600, 1200 or 2400 kg ha⁻¹. To ensure that all treatments received the same NPK amount, complementary doses of 04-30-10 without micronutrients were applied so that all treatments received the equivalent of 2400 kg ha⁻¹ of formulated and therefore the same doses of nitrogen, phosphorus and potassium, varying only the micronutrients doses. Coating NPK granules with micronutrient was better than the physical mixture of granulated micronutrient with NPK when comparing zinc concentration in the soil; similar increments in boron contents and greater availability of copper were observed. The dry matter production of maize shoots was greatest with micronutrient coated NPK fertilizer. Also the accumulation of boron, manganese, copper and zinc in shoots of maize plants was greater when the granules of NPK fertilizer were coated.

Keywords: boron, copper, manganese, zinc, granule mixture, coated granules.

¹Supervising Committee: Gaspar Henrique Korndorfer - UFU (Supervisor) and Hamilton Pereira Seron - UFU (Co-supervisor).

1. INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas atuais buscam lucratividade em função não só de boas produtividades, mas também de eficiência máxima em todo o processo produtivo, o que engloba o conceito de sustentabilidade e também evidencia uma preocupação recente com o uso de micronutrientes na agricultura.

Os micronutrientes cloro, ferro, molibdênio além do boro, cobre, manganês e zinco mesmo exigidos em quantidades muito pequenas pelas plantas são de fundamental importância, visto que têm grande participação no metabolismo vegetal, não podem ser substituídos por nenhum outro elemento e na ausência de qualquer um deles a planta não completa seu ciclo vital, o que os torna essenciais.

Embora todos esses micronutrientes estejam presentes na natureza, seus teores no solo, muitas vezes, não são suficientes para garantir altas produtividades, isso por que os solos brasileiros, em sua maioria, apresentam baixa fertilidade natural ou foram exauridos pelo cultivo continuado. Por essa razão os micronutrientes têm sido elaborados industrialmente e transformados ou adicionados aos fertilizantes, de modo a corrigir deficiências, o que têm constituído um aspecto fundamental no manejo das lavouras.

Os problemas de deficiência e de excesso de micronutrientes são condicionados pelas interações que ocorrem no solo, as quais dependem do manejo adotado no sistema de produção. O melhor entendimento da dinâmica nos diferentes tipos de solo e do requerimento pelas diversas culturas são etapas fundamentais na busca por maiores produtividades e uso eficiente de insumos, o que resulta em definições de doses, fontes, épocas e estratégias de aplicação de micronutrientes, maior lucratividade e, portanto, maior eficiência da atividade agrícola.

A cultura do milho apresenta elevado potencial de produção, no entanto, vários fatores, dentre eles a baixa fertilidade do solo podem causar reduções na produtividade. O milho necessita de pequenas quantidades de micronutrientes, no entanto a carência desses elementos é tão prejudicial quanto à de macronutrientes e até mesmo de água. Esse contexto torna a cultura do milho responsiva à aplicação de micronutrientes, a qual pode ser feita de diferentes métodos e com a utilização de diferentes fontes de micronutrientes, e passa a ser uma das responsáveis pelo alcance de produtividades elevadas.

São várias as formas de se fornecer micronutrientes às plantas, tanto que, atualmente, existem no mercado várias opções de fertilizantes contendo-os, para uso em diversas formas de aplicação, dentre elas a aplicação via solo. Nessa modalidade, esses elementos são comumente fornecidos em conjunto com macronutrientes, por exemplo, nitrogênio, fósforo e potássio, o que é feito através da utilização de formulados NPK com micronutrientes granulados e misturados aos demais grânulos, ou com os grânulos de NPK revestidos por micronutrientes.

A mistura de micronutrientes granulados em misturas NPK é uma forma bastante utilizada no Brasil por apresentar flexibilidade na obtenção de fórmulas variadas, no entanto sua utilização acarreta problemas de segregação e distribuição desuniforme dos micronutrientes.

No que se refere ao revestimento de grânulos com micronutrientes, a principal vantagem de sua utilização é a possibilidade de aplicar uniformemente as pequenas quantidades exigidas, reduzindo assim o problema de distribuição irregular causador de desequilíbrios nutricionais, sejam deficiências ou excessos, que prejudicam a eficiência da adubação, podendo causar perdas de nutrientes e/ou de produtividade.

Apesar da reconhecida importância da adubação com esses nutrientes, o tema não é satisfatoriamente contemplado nas ações de pesquisa e várias questões vêm sendo tratadas sem o devido respaldo científico.

Diante disso, o objetivo do trabalho foi comparar a disponibilização dos micronutrientes boro, cobre, manganês e zinco para o solo, sua absorção, acúmulo e efeito no desenvolvimento de plantas de milho, quando provenientes de uma mistura física de grânulos NPK e micronutrientes e de uma mistura granulada NPK revestida com esses micronutrientes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Micronutrientes na nutrição mineral de plantas

2.1.1. Importância

A importância dos micronutrientes para as plantas é evidenciada quando se observam as quantidades extraídas dos mesmos. São quantidades relativamente baixas, expressas em mg kg^{-1} na matéria seca, comparadas à extração de macronutrientes, essa quantificada em g kg^{-1} na matéria seca, porém de fundamental importância ao desenvolvimento das culturas. Reduções na produtividade e até morte de plantas são consequências naturais advindas de desequilíbrios nos processos metabólicos, ocasionados pela carência de micronutrientes (ORLANDO FILHO, 1993).

Os micronutrientes desempenham funções vitais no metabolismo das plantas, quer como parte de compostos responsáveis por processos metabólicos e/ou fenológicos, quer como ativadores enzimáticos (VITTI et al., 2011).

Os micronutrientes abordados nesse trabalho são fundamentais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, agindo como constituintes das paredes celulares (boro - B), das membranas celulares (B, zinco - Zn) e de enzimas (manganês - Mn, cobre - Cu), como ativadores enzimáticos (Mn, Zn) e na fotossíntese (Cu, Mn). Além disso, esses micronutrientes estão particularmente envolvidos na fase reprodutiva do crescimento das plantas e, conseqüentemente, na determinação da produtividade e da qualidade da colheita. E ainda o Mn e o Zn, conferem resistência contra estresses bióticos e abióticos, incluindo pragas e doenças (KIRKBY; RÖMHELD, 2007).

O teor inadequado destes micronutrientes nas culturas é limitante ao seu crescimento e pode passar despercebido, não só com efeito direto sobre o desenvolvimento da cultura, mas também reduzindo a eficiência de uso dos fertilizantes contendo macronutrientes (KIRKBY; RÖMHELD, 2007).

2.1.2. Boro

O boro é absorvido pelas raízes principalmente na forma de H_3BO_3 , mas também os ânions H_4BO_4^- e $\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_4^{2-}$ podem ser absorvidos, em menor escala. Após a absorção é translocado para a parte aérea e tende a se acumular nas margens e pontas das folhas. Depois de depositado nos tecidos é muito pouco móvel na planta, o que explica os sintomas de deficiência aparecerem nos tecidos jovens (FAVARIN; MARINI, 2000).

Esse micronutriente participa na ativação da enzima fosforilase do amido responsável pela síntese de amido, substância de reserva das sementes, raízes e colmos. Além disso, o boro está relacionado a muitos processos fisiológicos da planta que são afetados pela sua eficiência, como transporte de açúcares, síntese e estrutura da parede celular, lignificação, metabolismo fenólico, de carboidratos, RNA, AIA e de ascorbato, respiração e integridade da membrana plasmática (CAKMAK; RÖMHELD, 1997).

Os sintomas leves de deficiência deste micronutriente mostram pequenas estrias cloróticas e aquosas no espaço internerval das folhas jovens. As áreas cloróticas podem evoluir para necroses e pode haver também crescimento irregular do limbo foliar, o que tende a causar enrugamento em algumas bandas. Nos casos mais severos, os sintomas evoluem para a necrose das folhas, encurtamento do limbo foliar e necrose do tecido meristemático, causando os sintomas de necrose interna em forma de espiral no caule, próximo ao meristema apical (TOKESHI, 1991).

Plantas deficientes em boro apresentam também acumulação excessiva de auxinas e fenóis em função de necroses muitas vezes observadas em tecidos de plantas deficientes. Têm-se também folhas torcidas, tendendo a ficar quebradiças, cloróticas e mais tarde necróticas, ou com lesões translúcidas ou em forma de "sacos de água" entre as nervuras. Em plantas novas ocorre o surgimento de superbrotações pela morte dos meristemas apicais (VITTI et al., 2011).

Plantas deficientes em boro podem apresentar também grãos leves, bem como menor pegamento de florada e formação de sementes, seca de ponteiros com morte de gema terminal, proporcionando a concentração do hormônio de crescimento (AIA) nas folhas e ramos, pequeno desenvolvimento radicular, além do superbrotamento (FAVARIN; MARINI, 2000).

2.1.3. Cobre

O cobre é absorvido na forma de íon Cu^{+2} e também na forma de complexos orgânicos solúveis e, depois de absorvido, esse elemento tem pouca mobilidade no interior da planta (FAVARIN; MARINI, 2000).

O Cu é importante na fotossíntese tendendo a se acumular no cloroplasto por ser constituinte da plastocianina, onde atua no transporte de elétrons. Na respiração, atua na oxidação terminal pela enzima oxidase do citocromo. Também aumenta a resistência das plantas às doenças (principalmente fúngicas), pelo fato, de que na presença do Cu a atividade das peroxidases e catalases são diminuídas, causando acúmulo de fenóis e

peróxidos de hidrogênio nos tecidos, ambos com ações sobre fungos e bactérias. Ainda, tem participação na síntese protéica e é constituinte de diversas enzimas tais como ácido ascórbico oxidase, tirosinase, monoamina oxidase, uricase, citocromo oxidase, fenolase, lacase e plastocianina (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Outra contribuição importante desse micronutriente é a sua participação na síntese da leghemoglobina e no transporte de elétrons durante a fixação de nitrogênio, que ocorre no interior dos nódulos nas raízes (FAVARIN; MARINI, 2000).

A deficiência de cobre nas plantas pode ser diagnosticada visualmente, pelos sintomas de folhas amareladas, cloróticas e em alguns casos curvadas, e difícil aparecimento de folhas novas. Podem-se notar também sintomas de pequeno desenvolvimento da planta, enfraquecimento de caules e colmos e murcha mesmo em situações de boa disponibilidade de água (VITTI et al., 2011).

2.1.4. Manganês

O manganês é absorvido na forma de íon Mn^{+2} , porém, também pode haver absorção nas formas de Mn^{3+} e Mn^{4+} , no entanto, somente a forma mais reduzida é translocada para a parte aérea. No interior da planta, esse cátion é relativamente imóvel, não se translocando de um órgão para outro. Em consequência, os sintomas de deficiência aparecem em folhas novas (FAVARIN; MARINI, 2000).

O manganês é requerido para a atividade de algumas desidrogenases, descarboxilases, quinases, oxidases e peroxidases. Está envolvido com outras enzimas ligadas ao metabolismo de carboidratos, às reações de fosforilação, ao ciclo do ácido cítrico e na evolução fotossintética de oxigênio. É essencial para o processo de fotossíntese, sendo envolvido também na estrutura, funcionamento e multiplicação de cloroplastos e transporte de elétrons (TAIZ; ZEIGER, 2004).

De acordo com Tokeshi (1991) as plantas que apresentam deficiência de manganês apresentam clorose internerval convergente para a nervura central, porém uma estreita faixa ao longo das nervuras permanece verde, o que confere o aspecto de um reticulado de maior espessura (reticulado grosso). As áreas cloróticas podem evoluir para estrias necróticas e as cloroses tendem a atingir apenas parte do limbo foliar, localizando-se no ápice ou na base da folha, com a lâmina foliar tendendo a ser mais estreita. Em casos severos, a folha perde totalmente a cor verde, tornando-se uniformemente clorótica; nas regiões esbranquiçadas podem aparecer manchas necróticas que coalescendo produzem estrias contínuas de tecido morto. De um modo

geral a deficiência de Mn causa redução na taxa fotossintética, o que implica em menor desenvolvimento vegetal e queda de produtividade.

2.1.5. Zinco

Vários autores afirmam que o Zn é absorvido pelas raízes na forma catiônica bivalente (Zn^{+2}), porém em pH elevado, pode ser absorvido na forma de ZnOH^+ . Também existem referências citando que a forma quelatada de zinco é absorvida (RAIJ, 1991).

Malavolta et al., (1997) estima que cerca de 60% do Zn absorvido pelo sistema radicular provém do processo de difusão. Depois de absorvido, no que se refere à sua mobilidade no interior da planta, não há uma conclusão clara sobre sua remobilização, a qual parece depender do estado nutricional da planta, principalmente da distribuição adequada desse microelemento em toda a planta (BONOTTO, 2008). No entanto, sabe-se que a maior parte do Zn absorvido é exportada nos grãos, o que faz com que o aumento de produtividade promova maior retirada do micronutriente do solo, havendo necessidade de reposição adequada para não comprometer as safras subsequentes (MALAVOLTA et al., 1997; EMBRAPA, 2001).

O Zn desempenha papel fundamental na produção de auxinas (hormônio vegetal promotor do crescimento), pois ativa a enzima sintetase do triptofano e é fundamental no processo de ativação de várias enzimas essenciais no metabolismo vegetal. Assim, plantas deficientes em zinco têm seu crescimento prejudicado e, portanto são menores, raquíticas e com internódios curtos, além de poderem apresentar folhas com cloroses internervais e/ou lanceoladas em algumas espécies. Ainda em sementes, baixas concentrações de zinco podem prejudicar a germinação, o crescimento de plântulas, o estabelecimento e consequentemente o crescimento e a produtividade das plantas (CAKMAK, 2008; RENGEL; GRAHAM, 1995).

2.1.6. Micronutrientes na cultura do milho

Apesar do alto potencial produtivo da cultura do milho que se observa na prática é que sua produção no Brasil é muito baixa e irregular, variando de 2 a 3 toneladas de grãos ha^{-1} e 10 a 45 toneladas de massa verde ha^{-1} , para milho silagem. Considera-se que a fertilidade do solo seja um dos principais fatores responsáveis por essa baixa produtividade das áreas destinadas tanto para a produção de grãos como de forragem. Esse fato não se deve apenas aos baixos níveis de nutrientes presentes nos solos, mas

também ao uso inadequado de calagem e adubações, e também à alta capacidade extrativa do milho colhido (COELHO; FRANÇA, 2013).

Grande parte da área cultivada com a cultura do milho no Brasil é de áreas de solos intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural, com estrutura física adequada ao cultivo, mas com limitações químicas, caracterizadas também pelos baixos teores de macro e micronutrientes, o que torna necessária a adição de nutrientes ao solo através de adubação (FARIA; GUARDIEIRO, 2011).

As necessidades nutricionais da planta são determinadas pela quantidade de nutrientes que ela extrai durante o seu ciclo. No caso do milho, a extração total depende do rendimento obtido e da concentração de nutrientes nos grãos e na palha. Com relação aos micronutrientes, as quantidades requeridas pelas plantas de milho são muito pequenas, por exemplo, para uma produção de 9 t ha⁻¹ de grãos, são extraídos 170 g de B, 110 g de Cu, 340 g de Mn e 400 g de Zn, além de outros. Entretanto, a deficiência de um deles pode ter tanto efeito na desorganização de processos metabólicos quanto na deficiência de um macronutriente (COELHO; FRANÇA, 2013).

Como exemplo dos processos metabólicos afetados pela carência de micronutrientes pode-se citar o crescimento da planta, a fotossíntese e a respiração. Diante disso, visando altas produtividades de milho é necessário que se conheça as principais funções dos micronutrientes no metabolismo da planta (FAVARIN et al., 2008).

O B é essencial para a germinação do grão de pólen e formação do tubo polínico, por isso, espigas de plantas deficientes em boro são tipicamente encurvadas, uma vez que a uniformidade de seu crescimento está ligada à formação dos grãos. Outro sintoma típico de deficiência de boro em milho é o crescimento anormal da folha-bandeira, que permanece enrolada, conhecido como “pendão sufocado” (FAVARIN et al., 2008), embora a sensibilidade do milho à deficiência de B seja considerada baixa (COELHO et al., 2006).

O Cu é um importante ativador enzimático de vital importância nos processos de fotossíntese, respiração, metabolismo de carboidratos, redução e fixação de N, metabolismo de proteínas e formação da parede celular, cuja deficiência severa inibe a reprodução das plantas (FAVARIN et al., 2008), o que está associada à média sensibilidade do milho à deficiência de Cu (COELHO et al., 2006).

O Mn por sua vez atua síntese de metabólitos secundários e aminoácidos. Os problemas de toxidez de Mn nos solos brasileiros são mais comuns que os de

deficiência, por isso, o conhecimento da disponibilidade no solo tem importância fundamental para seu manejo. A tendência da aplicação superficial de calcário, como ocorre em plantio direto, tem provocado a deficiência de Mn sobretudo nas culturas de soja e milho. A deficiência é comum em milho cultivado após soja sem aplicação de Mn (FAVARIN et al., 2008) e de média sensibilidade para a cultura (COELHO et al., 2006).

No milho, o Zn atua como ativador enzimático, precursor de aminoácidos e hormônios e no crescimento dos tecidos, o que faz com que essa cultura seja uma das que mais responde à aplicação de Zn no solo, proporcionando ganhos de matéria seca e de grãos (FAVARIN et al., 2008). No Brasil, o Zn é o micronutriente mais limitante à produção do milho, o qual apresenta alta sensibilidade à deficiência desse elemento a qual é muito comum na região central do país, onde predominam solos de cerrado, com baixo teor de Zn no material de origem (COELHO; FRANÇA, 2013; COELHO et al., 2006).

Coelho e França (2013) afirmam que na maioria das pesquisas, a cultura do milho responde apenas às aplicações de Zn, devido aos demais micronutrientes estarem em níveis adequados de disponibilidade no solo ou serem fornecidos indiretamente através de outras fontes, como, por exemplo, calcário. Contudo, respostas aos demais micronutrientes podem ocorrer, principalmente em solos arenosos, com baixos teores de matéria orgânica e em cultivos irrigados com altos níveis de produtividade.

Vários trabalhos de pesquisa mostram que o milho responde às aplicações de micronutrientes, principalmente B, Mo, Mn e Zn, podendo também apresentar resposta ao Cu em áreas de plantio direto. Nestas áreas, com a possibilidade do cultivo de milho resistente ao glifosato, é imprescindível o uso frequente de micronutrientes, como Cu, Fe, Mn e Zn, devido à forte natureza metal-quelante do herbicida, a qual diminui a absorção e translocação dos micronutrientes na planta. Como a natureza do problema está relacionada com as alterações provocadas no solo, por parte do glifosato, surge a necessidade de aplicações foliares para suprir a demanda por esses nutrientes (FAVARIN et al., 2008).

Com relação aos métodos de aplicação, os micronutrientes podem ser aplicados na parte aérea das plantas, através da adubação foliar, nas sementes e através da fertirrigação. O método de aplicação, a solubilidade, a forma física (pó ou grânulo) das fontes de micronutrientes e certas condições de solo podem interagir de modo a resultar em maior ou menor efeito da adubação na correção de deficiências (COELHO;

FRANÇA, 2013). Tais deficiências de micronutrientes são frequentemente corrigidas também pela aplicação de fertilizantes no solo, porém, a pequena dose utilizada, de 1 a 10 kg ha⁻¹, conforme o nutriente prejudica a uniformidade de distribuição, em se tratando de mistura de grânulos (FAVARIN et al., 2008).

Dentre as principais fontes de micronutrientes para a cultura do milho, pode-se citar os óxidos (insolúveis em água, recomendados na forma de pó), os sulfatos, cloretos e nitratos (solúveis, indicados na forma de grânulos ou via foliar), os óxissulfatos (solubilidade variável, mais baratos), os quelatos (muito solúveis, bastante eficientes e caros), as “fritas” – FTE (produtos de baixa solubilidade, eficientes na forma de pó e incorporados) e as nanopartículas de óxidos (suspensões concentradas aplicadas via foliar) (FAVARIN et al., 2008).

2.2. Dinâmica e formas de micronutrientes no solo

Os micronutrientes têm comportamento químico bastante diferenciado no solo. O B é um não metal e forma sempre ligações covalentes e em condições naturais está na forma de ácido bórico. O Cu, juntamente com o Mn e o Zn, são metais pesados, mas ocorre na forma de sulfetos que sofrem intemperismo e liberam o íon Cu²⁺ e também os seus complexos. O Mn ocorre em silicatos e óxidos, nas valências 2+, 3+ e 4+, sendo o íon Mn²⁺ o mais importante em soluções ácidas. O Zn está na forma de sulfetos e silicatos, e pelo processo de intemperismo de minerais se transforma em Zn²⁺ (RAIJ, 1991b).

2.2.1. Boro

Em solos brasileiros, com diferentes texturas e graus de fertilidade, a deficiência de boro tem sido uma séria limitação para o pleno desenvolvimento de diversas culturas de interesse econômico, o que ocorre principalmente pela intensificação da agricultura e pelo incremento da produtividade que aumentam a exportação de boro, conduzindo ao esgotamento desse nutriente tendo por consequência a necessidade de sua reposição por meio de adubações (GALRÃO, 1988).

O B existe no solo principalmente nas formas solúvel, adsorvido, ligado à matéria orgânica ou fixado nos minerais de argila, sendo a primeira forma a mais importante para a nutrição de plantas (EATON, WILCOX, 1939; HINGSTON, 1964; SIMS, BINGHAM, 1967 apud GUPTA, 1993).

A faixa do teor de boro disponível no solo entre o limite de deficiência e o de toxicidade é bastante estreita, estando os teores de B no solo na faixa de 10 mg dm^{-3} e sua maior disponibilidade na faixa de pH entre 5,0 e 7,0 (KRAUSKOPF, 1972 apud ABREU et al., 2007).

O pH do solo é um fator importante na disponibilidade de boro no solo, sendo a mesma reduzida para as plantas com o aumento do pH, o que explica resultados de correlação negativa entre a absorção de B e aumento do pH do solo (GUPTA, 1993).

A umidade adequada no solo é também de fundamental importância pra que haja disponibilidade de B visto que sua forma no solo não apresenta cargas (H_3BO_3), o que em condições de pluviosidades elevadas e em solos arenosos, podem causar perdas por lixiviação (ABREU et al., 2007). Por sua vez, condições de seca também são desfavoráveis devido ao fato de, nessas condições, haver menor decomposição da matéria orgânica do solo (principal fonte de B) e também menor absorção do elemento, devido ao seu menor transporte e ao menor desenvolvimento radicular (ABREU et al., 2007).

Geralmente, solos de regiões úmidas apresentam baixa disponibilidade de B devido às perdas por lixiviação, tendendo o B disponível em tais solos aparecer nos primeiros centímetros da camada de matéria orgânica (WERKHOVEN, 1964; KANWAR; SINGH, 1961 apud GUPTA, 1993).

O teor de matéria orgânica de um solo influencia grandemente a disponibilidade de B, sendo essa uma das principais fontes de boro para solos ácidos, já que nessas condições, é menor a quantidade do elemento adsorvida à fração mineral (OKAZAKI; CHAO, 1968 apud GUPTA, 1993). Segundo Gupta (1968 apud GUPTA, 1993), são positivas as correlações entre teor de matéria orgânica do solo e disponibilidade de boro e Parks e White (1963 apud GUPTA, 1993) afirmam que a formação de complexos de B com a matéria orgânica é um mecanismo importante de retenção de boro no solo.

Por fim, a textura do solo tem se mostrado como fator importante na disponibilidade de B (WEAR; PATTERSON, 1962 apud GUPTA, 1993). A relação observada entre a disponibilidade de B e textura do solo pode ser atribuída à adsorção do elemento às partículas de argila em solos de textura fina, o que ocorre com boro proveniente dos minerais do solo, da matéria orgânica ou dos fertilizantes e permanece em equilíbrio com o B na solução do solo (EATON; WILCOX, 1939, BINGHAM, 1973 apud GUPTA, 1993). Em função disso, geralmente, maiores doses são aplicadas em solos com altos teores de argila e matéria orgânica, devido à adsorção do boro aos

colóides do solo, principalmente em pHs próximos a neutralidade (ALEONI, 1996). Solos arenosos por sua vez apresentam perdas de B por lixiviação (GUPTA, 1993), a qual ocorre de maneira mais rápida quando comparada com solos com maior teor de argila (REISENAUER et al., 1973 apud GUPTA, 1993) embora esses, geralmente exijam maiores aplicações para alcançar as mesmas concentrações de B nas plantas (GUPTA, 1993).

2.2.2. Cobre

O Cu é dentre os micronutrientes o menos móvel no solo devido à sua forte adsorção aos colóides orgânicos e inorgânicos. De acordo com Krauskopf (1972 apud ABREU et al., 2007) ocorre geralmente em formas metálicas em alguns minerais e também nas formas iônicas de Cu^+ e principalmente Cu^{2+} em teores aproximados de 30 mg dm^{-3} , com maior disponibilidade entre pH 5,0 e 6,5.

A matéria orgânica é o principal fator que condiciona a disponibilidade e a mobilidade desse elemento no solo, isso em função da formação de complexos estáveis, os quais podem causar problemas de deficiência em solos orgânicos ou perdas por lixiviação em solos arenosos (geralmente mais pobres em matéria orgânica). Independente do tipo de solo, a presença de outros íons metálicos como ferro, manganês e alumínio pode reduzir a disponibilidade de cobre (ABREU et al., 2007).

2.2.3. Manganês

No que se refere ao Mn, suas concentrações no solo atingem valores bem maiores, com média de 600 mg dm^{-3} e a faixa de pH do solo entre 5,0 e 6,5 também é a que mais favorece a disponibilidade de manganês no solo. Dentre os fatores que podem causar deficiências desse elemento no solo estão aeração e o teor de matéria orgânica além da presença de outros íons como cálcio, magnésio e ferro (KRAUSKOPF, 1972 apud ABREU et al., 2007)

A aeração do solo interfere na disponibilidade de Mn devido à sua grande facilidade em mudar seu grau de oxidação o que causa alta dependência das relações entre as formas reduzidas, assimiláveis (Mn^{2+}) e oxidadas ou não disponíveis com as reações de oxirredução do solo. Esse micronutriente também pode se complexar com a matéria orgânica e no caso de formação de complexos estáveis pode haver indisponibilidade do elemento (ABREU et al., 2007).

2.2.4. Zinco

Possivelmente o Zn é o micronutriente mais estudado no Brasil, principalmente por sua baixa disponibilidade natural e pelas respostas positivas da maioria das culturas ao fornecimento desse micronutriente, especialmente nos solos do cerrado (FURTINI NETO et al., 2008).

O teor médio de Zn no solo é de aproximadamente 50 mg dm^{-3} (KRAUSKOPF, 1972 apud ABREU et al., 2007) e, segundo Barbosa Filho et al. (1994), as formas de Zn no solo podem ser hidróxidos, óxidos ou também carbonatos e sulfatos. Esses autores citam também que esse elemento pode estar na solução do solo, na forma trocável no complexo coloidal, na matéria orgânica e na rede cristalina dos minerais (forma essa, não disponível para as plantas).

Além das características dos fertilizantes e dos requerimentos nutricionais das culturas, uma gama de outros fatores pode interferir no aproveitamento do Zn adicionado via adubação, isso porque o Zn é um cátion metálico cuja disponibilidade para as plantas é influenciada principalmente por reações com minerais de argila, óxidos metálicos e com a matéria orgânica, sendo muito afetada pelo pH (SOUZA; FERREIRA, 1991; BARROW, 1993).

De acordo com Abreu et al. (2007), a maior disponibilidade de zinco ocorre em pH que varia de 5,0 a 6,0. Valores de pH em água acima de 6,0 e saturação por bases maior que 50% podem provocar redução na disponibilidade de micronutrientes catiônicos. A calagem excessiva indisponibiliza o Zn pelo aumento da adsorção e fixação do micronutriente (SOUZA; FERREIRA, 1991) e pela formação de óxidos cuja solubilidade depende do pH (VOLKWEISS, 1991).

A calagem excessiva no cerrado também é prejudicial para o milho, podendo reduzir sua produção mesmo sob aplicação de altas doses de Zn (LOPES, 1991), o qual apresenta nível crítico no solo de 1 mg dm^{-3} para essa cultura quando o pH do solo está em torno de 6,0 e aumenta com a elevação deste (GALRÃO, 2002). Galrão (1986) observou que o excesso de calcário reduz a produção por elevar demasiadamente o pH, induzindo a deficiência de Zn nas plantas, mesmo com a aplicação de $6,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de Zn, a lanço e incorporado em área total.

Além do pH outros fatores também interferem na disponibilidade de Zn, por exemplo solos arenosos, com baixa CTC e sujeitos a chuvas intensas podem se tornar deficientes em Zn, o que ocorre também quando esse micronutriente se complexa com a matéria orgânica do solo. No entanto, em solos com maior teor de argila o zinco pode

ser fortemente adsorvido o que implica em menores perdas por lixiviação além de maior efeito residual (ABREU et al., 2007).

Ocorrem ainda interações negativas ou antagônicas com outros nutrientes, especialmente o fósforo, o qual, se aplicado em altas doses pode induzir a deficiência de Zn devido a diferentes interações que ocorrem no solo e na planta, comprometendo o crescimento e produção, conforme observado por Araújo et al. (2003) quando forneceram 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato triplo no sulco de semeadura do milho. Também níveis elevados de cálcio, magnésio e potássio inibem a absorção de Zn (ABREU et al., 2007; LONERAGAN; WEBB, 1993).

Tais tipos de interações antagônicas entre Zn e outros nutrientes são comuns e podem provocar problemas de desbalanço nutricional e de deficiência. Essas interações devem ser mais críticas para o desenvolvimento das culturas nos sistemas de manejo que visam altas produtividades, nos quais o equilíbrio nutricional pode representar significativo ganho de produção (FURTINI NETO et al., 2008).

2.3. Adubação com micronutrientes

2.3.1. Importância

Em um novo contexto agrícola, onde o que se busca é lucratividade em função de boas produtividades e eficiência máxima em todo o processo, o que abrange também o conceito de sustentabilidade, é que se insere a intensificação recente do uso dos micronutrientes na agricultura (ABREU et al., 2007).

A preocupação principal do agricultor sempre foi a manutenção da fertilidade do solo por meio de adubações para o fornecimento de macronutrientes, os quais proporcionam alta resposta em produção. No entanto, diversos estudos evidenciam a obtenção de consideráveis ganhos de produtividade devido à aplicação de micronutrientes (RESENDE, 2005). Por exemplo, Dev et al., (2011) que convenceram produtores parceiros de um estudo onde foi demonstrado que aplicação equilibrada de fertilizantes contendo Zn e outros micronutrientes baseada na análise de solo foi capaz de aumentar a produtividade de culturas como aveia, sorgo, arroz, tomate e algodão em até 24%.

No Brasil, os principais motivos que despertaram o maior interesse pela utilização de fertilizantes contendo micronutrientes foram: o início da ocupação agrossilvopastoril da região dos cerrados formada por solos deficientes em micronutrientes por natureza geológica e também devido ao intemperismo intenso a que

foram submetidos; o aumento da produtividade de inúmeras culturas com maior remoção e exportação de todos os nutrientes; a incorporação inadequada de calcário ou a utilização de doses elevadas acelerando o aparecimento de deficiências induzidas; o aumento na proporção de produção e utilização de fertilizantes NPK de alta concentração, com reduzido conteúdo incidental de micronutrientes nesses produtos devido a maior eficiência dos processos de remoção de impurezas; e também o aprimoramento das análises de solo e foliares como instrumentos de diagnose de deficiências de micronutrientes (LOPES, 1999; LOPES; ABREU, 2000).

Ocorrências de tais deficiências de micronutrientes têm sido relatadas desde a década de 50, especialmente para B e Zn, mas com frequência variável de acordo com a região e a cultura (MALAVOLTA, 1994; LOPES; ABREU, 2000). As respostas mais frequentes em solos de cerrado são para B nas culturas de algodão, soja e trigo, Cu em soja e trigo e Zn em arroz, milho, soja e café (GALRÃO, 1998).

Atualmente, estão prescritos na Legislação Brasileira sete elementos químicos (boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco) que absorvidos pelas plantas em pequenas quantidades satisfazem os três critérios de essencialidade propostos por Arnon e Stout em 1939, sendo, portanto, considerados essenciais para o desenvolvimento vegetal (VALE, 2000).

Embora todos esses elementos micronutrientes estejam presentes na natureza, seus teores são insuficientes para garantir altas produtividades à agricultura, e por essa razão são elaborados industrialmente e transformados ou adicionados aos fertilizantes (MONTEIRO FILHO, 2005), o que nos últimos anos, gerou um aumento de 13,3 vezes no consumo de micronutrientes na agricultura brasileira, enquanto o incremento no uso de macronutrientes no mesmo período foi apenas de 2,1 vezes (YAMADA, 2004).

Sendo assim, os micronutrientes passaram de um reconhecimento causal como “elementos traço” ou “oligoelementos” para serem considerados como produtos químicos agrícolas de importância comercial (SAUCHELLI, 1963), sendo tão importantes para o desenvolvimento vegetal quanto os macronutrientes. A diferença, no entanto, está no fato de que para correção de deficiências que ocorram no solo, as quantidades utilizadas são, comparativamente, muito menores (NIKITIN, 1967).

A adubação com micronutrientes envolve aspectos que necessitam ser examinados, incluindo, além da análise do solo, respostas das culturas, fontes e métodos de aplicação do fertilizante, critérios de recomendação e legislação de fertilizantes (LOPES, 1999; LOPES; ABREU, 2000).

2.3.2. Formas de aplicação

As quantidades de micronutrientes exigidas pelas plantas são reduzidas, quando comparados com os chamados NPK, incluindo também o magnésio, o cálcio e o enxofre. (FERREIRA et al., 2001). No entanto, as quantidades reduzidas requeridas pelas culturas em geral, não conferem função secundária ou de menor importância para esses elementos; pois a deficiência, assim como o excesso, podem causar reduções na produção vegetal (MENGEL, 1980; ROMHELD; MARSCHNER, 1991).

Essas pequenas quantidades de micronutrientes exigidas pelas culturas também implicam em pequenas quantidades a serem fornecidas, o que dificulta a uniformidade do processo de aplicação. Sendo assim fertilizantes líquidos e sólidos contendo micronutrientes são fontes para a adição desses elementos ao solo (MORTVEDT, 1991).

Os micronutrientes não podem ser aplicados nas suas formas químicas naturais, sendo necessária a busca por minérios que sejam fontes adequadas desses elementos, os quais estão disponíveis, na sua maioria na forma de óxidos, carbonatos, sulfitos e silicatos e são extraídos a custo relativamente baixo (NIKITIN, 1967).

Segundo Abreu et al. (2007), as formas de aplicação de micronutrientes visando maior eficiência e uniformidade de aplicação podem variar entre aplicação via sementes, via raízes de mudas, aplicação foliar, via adubação fluida ou fertirrigação ou também via solo.

A aplicação via solo apresenta alguns desdobramentos em função do local de aplicação (área total, linhas, faixas ou covas), da forma com que se utilizam os micronutrientes (granulada, em pó ou em solução) e da fonte de micronutrientes (LOPES, 1999).

2.3.3. Fontes de micronutrientes

Uma vez estabelecida a necessidade de aplicação de micronutrientes, deve-se escolher não somente a melhor forma de aplicação, ou a mais recomendada de acordo com a situação (LOPES, 1999), mas também a melhor fonte, considerando que as fontes de micronutrientes variam consideravelmente na sua forma física, reatividade química, custo e eficiência agrônômica (ABREU et al., 2007).

Os fertilizantes contendo micronutrientes podem ser fertilizantes inorgânicos simples contendo-os na forma de sais solúveis em água, como os cloretos, sulfatos e nitratos; podem também ser quelatos, complexos orgânicos ou óxidos silicatados

(“fritas”), além de fontes inorgânicas com micronutrientes na forma de sais metálicos insolúveis em água, como os carbonatos, fosfatos, oxissulfatos e os óxidos, ou também misturas granuladas NPK ou misturas de grânulos NPK, aos quais os micronutrientes são adicionados por meio de mistura, incorporação ou revestimento (LOPES, 1999; ABREU et al., 2007).

2.3.3.1. Óxidos

A legislação brasileira de fertilizantes e corretivos define como óxidos, enquanto fonte de micronutrientes, produtos insolúveis em água, mas com formas de micronutrientes disponíveis às plantas quando aplicadas no solo (VALE, 2000).

A água é considerada o extrator universal e a quantidade por ela extraída é indicação da presença de elementos altamente solúveis e prontamente disponíveis. Pode-se considerar a solubilidade em água como o “teor nobre” de um elemento contido em um produto (VALE, 2000). Além disso, a solubilidade em água é um fator determinante da eficiência agrônômica no curto prazo, para aplicações localizadas em sulco e produtos na forma granulada (LOPES, 1999).

Nesse contexto, e por serem os óxidos as fontes de menor solubilidade dos micronutrientes metálicos, geralmente seu preço por unidade de micronutriente é menor do que os de fontes solúveis como os sulfatos, o que passa a ser uma vantagem de sua utilização (LOPES, 1991).

Decaro et al., (1983) avaliaram os efeitos de sulfato e óxido de zinco na cultura do milho e não observaram diferença entre as fontes, mas, analisando o caráter econômico da utilização de óxidos, os resultados mostram que o ótimo econômico para o caso do sulfato de zinco situou-se na faixa de 5-10 kg ha⁻¹ de Zn, enquanto para o óxido essa faixa foi um pouco superior, 10-15 kg ha⁻¹ de Zn, o que, certamente, se explica pela menor solubilidade, mas também pelo menor custo.

A preocupação com a granulometria de um óxido surge, pois a disponibilidade para as plantas, de micronutrientes na forma de óxidos insolúveis em água diminui com o aumento de tamanho de partículas pela diminuição da superfície específica (MORTVEDT, 1991).

Moreira (2003) também afirma que a eficiência dos óxidos sempre irá depender da granulometria do produto (mais fino melhor) e de condições mais ácidas, as quais favorecem a solubilização do produto.

Alguns óxidos como o óxido de cobre, podem ser utilizados na forma como foram extraídos no processo de mineração, mas a disponibilidade para as plantas de outros óxidos, como a do óxido de manganês, é tão baixa, que seu uso não é recomendado diretamente na agricultura (LOPES, 1991).

Por essa razão, os óxidos têm menor eficiência para as culturas principalmente se aplicados na forma granular, uma vez que a superfície específica é bastante reduzida neste caso (LOPES, 1991).

Por exemplo, Mortvedt (1992) avaliou a disponibilidade do Zn contido em diferentes produtos, com solubilidade em água variando de 0 a 100% do teor total, nas formas moída e granulada e concluiu que a disponibilidade do elemento nos produtos moídos foi semelhante, independente da solubilidade em água, no entanto, nos produtos granulados, à medida que se aumenta a solubilidade em água do fertilizante, maior é a produção de matéria seca e a absorção de Zn pelas plantas que receberam esses produtos.

Também Malavolta et al., (1987) estudaram o efeito das fontes sulfato de zinco, óxido de zinco e uma “frita” na cultura do milho e encontraram as maiores produções de matéria seca maiores para a fonte solúvel ($1,0 \text{ kg ha}^{-1}$) e para as fontes insolúveis aplicadas no dobro da dose. A aplicação das fontes insolúveis em água não causou toxicidade às plantas, e conseqüentemente redução no desenvolvimento como observado na utilização das maiores doses de sulfato, no entanto, o teor de Zn residual no solo devido ao óxido e à frita foi aproximadamente a metade do deixado pelo sulfato. Esses resultados mostram que as fontes insolúveis conseguem disponibilizar o Zn, no entanto esse micronutriente contido no sulfato se mostrou mais disponível às plantas.

No entanto, Moreira (2003) afirma que, apesar da baixa solubilidade em água existem produtos no mercado de boa qualidade, e que os óxidos conseguem apresentar bons resultados, como os de Barbosa Filho et al., (1982) que compararam o efeito de sulfato, cloreto e óxido de zinco, com duas fritas comerciais e concluíram que não houve diferença significativa entre as três primeiras fontes empregadas, as quais se mostraram mais eficientes quanto à produção de grãos de arroz.

2.3.3.2. Fertilizantes NPK contendo micronutrientes

Misturas de grânulos NPK são fertilizantes submetidos à uma mistura física de dois ou mais fertilizantes simples previamente granulados e caracterizam-se por

apresentar os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) em grânulos distintos e nas formas de N, P_2O_5 e K_2O , respectivamente (ALCARDE, 2007).

Por causa das pequenas doses aplicadas, a uniformidade de aplicação de micronutrientes nas lavouras pode ser um problema. Assim, o fornecimento de micronutrientes agregados aos formulados NPK na adubação de base tem-se tornado habitual, sejam eles incorporados ou no revestimento dos grânulos de NPK (RESENDE, 2005).

Um exemplo a ser citado é o Zn, o qual é aplicado principalmente via solo e em doses inferiores a 10 kg ha^{-1} , o que torna difícil sua distribuição isolada no campo, e faz com que fertilizantes NPK sejam utilizados como veículo para sua distribuição, por permitirem maior uniformidade de distribuição com equipamentos convencionais, além de redução de custos, pela eliminação de uma operação de aplicação exclusiva para esse micronutriente. A aplicação de Zn ao solo é feita principalmente através dessa adição à formulados NPK, seja por incorporação do micronutriente ao grânulo, ou simplesmente pela mistura de grânulos. Com isso, na prática, formulados NPK contendo Zn são utilizados para todos os tipos de solo para facilitar a uniformidade de aplicação de pequenas doses. (MORTVEDT; GILKES, 1993).

A inclusão de micronutrientes em formulações de fertilizantes é uma prática que tende a se tornar mais intensa, o que exige o uso de sais com grau de pureza elevada e adição de quantidades específicas de fontes de micronutrientes (SAUCHELLI, 1967).

Segundo Lopes (1999), a utilização de misturas de fertilizantes NPK com fertilizantes contendo micronutrientes e também a incorporação de micronutrientes a esses fertilizantes são algumas das maneiras de aumentar a uniformidade de aplicação visando uma maior eficiência dos micronutrientes para as culturas. Além disso, adição de micronutrientes aos fertilizantes granulados NPK feita através da incorporação ou revestimento após o processamento industrial de obtenção é uma alternativa prática e econômica (LOPES, 1991).

As quantidades de micronutrientes a serem adicionadas dependem do tipo de cultura a ser implantada com a utilização desses fertilizantes e também do tipo de solo, sendo que solos mais pesados exigem uma quantidade maior de micronutrientes nas fórmulas quando comparados a solos de textura leve. Essas características devem ser conhecidas pelo fabricante para orientar a formulação (NIKITIN, 1967).

Na maioria dos formulados, a concentração de cada micronutriente não ultrapassa 0,5%, mas a distribuição na lavoura é facilitada (VOLKWEISS, 1991). A

dificuldade é encontrar fertilizantes contendo o micronutriente necessário na quantidade requerida para diferentes condições de cultura e solo (RESENDE, 2005).

2.3.3.2.1. Mistura de micronutrientes com grânulos NPK

A mistura de micronutrientes com fertilizantes simples ou em misturas NPK é uma das formas mais utilizadas para a adubação com micronutrientes via solo na agricultura nacional (LOPES, 1999).

A vantagem do seu uso está na possibilidade de obtenção de formulações que consigam atender recomendações específicas, tanto de N, P_2O_5 e/ou K_2O , quanto de micronutrientes (ABREU et al., 2007). Como por exemplo o Zn, citado por Mortvedt e Gilkes (1993) no que se refere à utilização de Zn adicionado ao formulado NPK na forma de mistura.

Um fertilizante desse tipo deve ser submetido a um processo completo de mistura, realizado o mais próximo possível do período de aplicação, com tempo de contato suficiente entre os fertilizantes, matérias primas com o menor teor de umidade possível, de modo a se evitar, por exemplo, problemas de empedramento e garantir a maior homogeneidade possível (SAUCHELLI, 1967; LOPES, 1999).

O principal problema que pode surgir é a segregação durante o processo de mistura, no manuseio e conseqüentemente na aplicação, implicando em distribuição desuniforme, o que é crítico devido às pequenas doses recomendadas (LOPES, 1999; MORTVEDT; GILKES, 1993; MORTVEDT, 1991).

Mortvedt (1991) aponta uma possível solução para tal, a utilização de grânulos de tamanhos semelhantes, pois a principal causa da segregação é a diferença no tamanho dos grânulos, embora haja também influência de forma e densidade dos mesmos, de acordo com estudos citados por Lopes (1999).

Uma mistura de grânulos contendo micronutrientes permanecerá homogênea desde que essas características confirmem ao produto final partículas de tamanho semelhante e que não se deteriore durante o armazenamento (MORTVEDT, 1991).

Outro problema decorrente da utilização de misturas NPK com micronutrientes é que, mesmo havendo uniformidade no tamanho de grânulos, o número de locais do solo que recebe o micronutriente granulado é inferior ao obtido caso esse se encontrasse na forma de pó, incorporado ou revestindo os grânulos de NPK (LOPES, 1999). Além disso, Mortvedt (1991) cita que para o caso de fontes com baixa solubilidade, a

disponibilidade do nutriente para as plantas diminui à medida que o grânulo aumenta, o que se explica pela redução da superfície específica.

2.3.3.2.2. Micronutrientes no revestimento de fertilizantes NPK

O processo de revestir grânulos de NPK, misturas granuladas ou fertilizantes simples com micronutrientes é outra alternativa para melhorar a uniformidade de aplicação desses elementos (ABREU et al., 2007).

Geralmente, espera-se que a eficiência agronômica de micronutrientes que revistam grânulos seja semelhante à dos micronutrientes incorporados, bem como sua distribuição no solo e suas reações após a dissolução (LOPES, 1999).

A técnica consiste no espalhamento da fonte de micronutrientes na forma de pó fino sobre o fertilizante, na presença de um agente agregante ou ligante, sabendo-se que esse componente, dependendo do material, pode alterar a característica agronômica do produto final (AMADO, 2005). Alguns ligantes podem inibir as reações dos micronutrientes com os grânulos, porém outros ajudam a promovê-las e permitem boa aderência (LHER, 1991).

Segundo Lopes (1999) outra preocupação que deve existir surge porque alguns materiais usados como agentes agregantes não conseguem reter o revestimento com micronutrientes durante o ensacamento, armazenamento e manuseio do fertilizante, o que pode resultar em segregação e distribuição desuniforme. Esse autor recomenda como ligantes soluções contendo fertilizantes em função dos teores exigidos pela garantia não diminuírem consideravelmente.

Embora possam ocorrer possíveis reações químicas indesejáveis durante ou após o processo de adição de micronutrientes aos fertilizantes NPK nas formas de revestimento ou incorporação, a principal preocupação está em garantir uma distribuição uniforme das pequenas quantidades de micronutrientes através do grande volume de fertilizante aos quais estão adicionados (SAUCHELLI, 1967).

Para isso os formulados NPK que contêm micronutrientes devem ter boas propriedades físicas, as quais são obtidas pela cura apropriada das fontes de macronutrientes, pelo ajuste adequado do pH do produto final e também pela prevenção do acúmulo de umidade durante o armazenamento (NIKITIN, 1967).

Os micronutrientes, incluindo o manganês têm sido utilizados no revestimento de grânulos, o que, se tratando de boa homogeneidade não só previne segregação, mas

também aumenta sua eficiência (WALTER; WETHERLET, 1985 apud GRAHAM et al., 1988).

Outro exemplo disso é o zinco, que de acordo com Mortvedt e Gilkes (1993), quando utilizado no revestimento de grânulos de fertilizantes NPK, elimina grande parte da possibilidade de haver segregação.

Apesar do uso generalizado, faltam informações sobre modos de aplicação e eficiência de fontes de micronutrientes em diferentes solos e culturas (VOLKWEISS, 1991; LOPES, 1999), faltam também maiores estudos sobre fontes de micronutrientes misturadas ou incorporadas a fertilizantes NPK (RESENDE, 2005), principalmente no Brasil, onde as pesquisas avaliando o efeito de micronutrientes em diferentes formas em fertilizantes sejam mistura, incorporação ou revestimento são raras e, particularmente, não só no Brasil, mas também no exterior, pouco tem sido estudado para comparar a técnica de revestimento com as demais (ABREU et al. 2007).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização dos fertilizantes

Foram utilizados três fertilizantes: NPK sem micronutrientes (mistura de grânulos), NPK com micronutrientes misturados aos grânulos (mistura de grânulos) e NPK com micronutrientes no revestimento de grânulos (mistura granulada).

Os três fertilizantes foram de formulação 04-30-10, formulados com fosfato monoamônio (10-54-00), superfosfato simples (00-18-00), superfosfato triplo (00-46-00) e cloreto de potássio (00-00-60) na forma granulada (granulometria de no máximo 4% retido na peneira 4 mm e 5% passante na peneira 1 mm).

A proporção de micronutrientes nos dois fertilizantes que os continham era de 0,1% B, 0,2% Cu, 0,2% Mn e 0,3% Zn, a qual foi determinada de acordo com as condições de produção na indústria e, portanto, escolhida pelo próprio fabricante.

O fertilizante contendo micronutrientes na forma de mistura de grânulos foi formulado com ulexita acidulada (10% de B e 90% solúvel em água), óxido de manganês acidulado (20% de Mn total e 75% solúvel em água), óxido de cobre acidulado (2,5% de Cu e 80% de solubilidade em água) e óxido de zinco acidulado (25% de Zn e 70% solúvel em água), granulados antes da mistura com os grânulos de NPK, sendo o óxido de cobre e o óxido de manganês granulados juntos, e todos com granulometria de no máximo 4% retido na peneira 4 mm e 5% passante na peneira 1 mm.

Para o fertilizante com micronutrientes no revestimento de grânulos, a formulação foi feita com ulexita (15,5% de B total), óxido de manganês (50% de Mn total), óxido de cobre (25% de Cu total) e óxido de zinco (80% de Zn total) finamente moídos (granulometria de 100% passante na peneira 0,15 mm). Para sua adesão aos grânulos de NPK foi utilizado agregante e óleo vegetal.

3.2. Delineamento

Os experimentos foram montados em delineamento experimental de blocos casualizados, em esquema fatorial 5 x 2 + 1 sendo 5 doses, 2 tipos de fertilizantes contendo micronutrientes, mais um tratamento adicional que não recebeu adubação com micronutrientes, totalizando 11 tratamentos (Tabela 1). Foram utilizadas quatro repetições, o que resultou em 44 parcelas. Houve complementariedade nas doses para que todos os tratamentos recebessem o equivalente a 2400 kg ha⁻¹ dos formulados e,

portanto a mesma dose de N, P₂O₅ e K₂O, variando somente as quantidades dos micronutrientes B, Cu, Mn e Zn (Tabela 1).

TABELA 1. Tipo de fertilizante e quantidade de nutrientes fornecidas ao solo em cada tratamento.

| Formulado NPK | | | Nutrientes | | | | | | |
|---------------------------------|--------------|---------------------|------------|-------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|
| Com Micronutrientes | | Sem Micronutrientes | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | B | Cu | Mn | Zn |
| Mistura | Revestimento | | | | | | | | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 2400 | 96 | 720 | 240 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 150 | 0 | 2250 | 96 | 720 | 240 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,4 |
| 300 | 0 | 2100 | 96 | 720 | 240 | 0,3 | 0,6 | 0,6 | 0,9 |
| 600 | 0 | 1800 | 96 | 720 | 240 | 0,6 | 1,2 | 1,2 | 1,8 |
| 1200 | 0 | 1200 | 96 | 720 | 240 | 1,2 | 2,4 | 2,4 | 3,6 |
| 2400 | 0 | 0 | 96 | 720 | 240 | 2,4 | 4,8 | 4,8 | 7,2 |
| 0 | 150 | 2250 | 96 | 720 | 240 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,4 |
| 0 | 300 | 2100 | 96 | 720 | 240 | 0,3 | 0,6 | 0,6 | 0,9 |
| 0 | 600 | 1800 | 96 | 720 | 240 | 0,6 | 1,2 | 1,2 | 1,8 |
| 0 | 1200 | 1200 | 96 | 720 | 240 | 1,2 | 2,4 | 2,4 | 3,6 |
| 0 | 2400 | 0 | 96 | 720 | 240 | 2,4 | 4,8 | 4,8 | 7,2 |

3.3. Experimento 1

3.3.1 Instalação

O primeiro experimento foi conduzido em casa de vegetação, durante um período de 28 dias, com amostras de solo retiradas dos 20 cm superficiais de um solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2009), textura média, cuja caracterização química e física é apresentada na tabela 2.

TABELA 2. Caracterização química e física das amostras de um solo classificado como do Latossolo Vermelho Distrófico típico.

| pH H ₂ O | P | K | Al ³⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | SB | t | T | V | m | M.O. |
|---------------------------------|---------------------------------|----|------------------|------------------|--|-------|--------|------|---------|----|----------------------|
| | ----- mg dm ⁻³ ----- | | ----- | | cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | -- % -- | | dag kg ⁻¹ |
| 5,3 | 0,9 | 26 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,37 | 0,77 | 3,17 | 12 | 52 | 1,3 |
| B | Cu | Fe | Mn | Zn | Areia | Silte | Argila | | | | |
| ----- mg dm ⁻³ ----- | | | | | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| 0,08 | 1,5 | 69 | 3,8 | 0,7 | 775 | 30 | 195 | | | | |

P, K = (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) P disponível (extrator Mehlich-1); Ca, Mg, Al, (KCl 1 mol L⁻¹); H+Al = (Solução Tampão – SMP a pH 7,5); SB = Soma de Bases; t = CTC efetiva; T = CTC a pH 7,0; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio (EMBRAPA, 1997), M.O. = Método Colorimétrico. B = (BaCl₂ . 2H₂O 0,125% à quente); Cu, Fe, Mn, Zn = (DTPA 0,005 mol L⁻¹ + TEA 0,1 mol L⁻¹ + CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ a pH 7,3).

As amostras de solo depois de coletadas foram peneiradas ainda úmidas e em seguida submetidas a processo de incubação, por 30 dias dentro de sacos plásticos contendo 60 kg de solo. Esse processo de incubação consistiu em deixar o solo em repouso para que a reação dos corretivos acontecesse. Nesse caso foram aplicados CaCO_3 (P.A) e MgCO_3 (P.A.) nas doses de 0,6 g kg de solo⁻¹ e 0,25 g kg de solo⁻¹ respectivamente, de modo que a relação Ca:Mg fosse corrigida para 3:1 e a saturação por bases para 70%. Essa saturação é superior aos 50 e 60% recomendados por Alvarez e Ribeiro (1999) e Alves et al., (1999), o que fornece certa garantia ao desenvolvimento das plantas. Para que houvesse a reação dos corretivos foi adicionada água na quantidade de 84 mL kg de solo⁻¹ em cada um dos sacos de solo, de modo a complementar a umidade atual do mesmo que era de 87,5 mL kg de solo⁻¹, e atingir aproximadamente 80% da sua capacidade de campo.

Após 30 dias de incubação o solo foi retirado dos sacos e seco ao ar, posteriormente, foram pesados 5 kg de TFSA os quais foram acondicionados em vasos plásticos com capacidade para 5L, formando assim as parcelas experimentais.

3.3.2. Condução

Os tratamentos foram aplicados ao volume total de solo (5 kg) na data da semeadura. Em seguida, os vasos receberam água equivalente a 160 mL kg de solo⁻¹, para que fosse feita a semeadura de 10 sementes de milho (híbrido AG 1051). Logo após, foi aplicado o equivalente a 80 kg ha⁻¹ de S, utilizando-se como fonte o $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ em solução, com concentração de 30,75 g L⁻¹ e volume de aplicação de 10 mL kg de solo⁻¹.

Aos sete dias após a semeadura (DAS) foi feito o desbaste das plantas, deixando apenas as três plantas mais vigorosas por vaso. Decorridos 11 DAS, semanalmente, foi aplicada adubação nitrogenada de cobertura na dose de 200 kg ha⁻¹ N e para isso foi utilizado $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ em solução, com concentração de 50 g L⁻¹ e volume de aplicação de 10 mL kg de solo⁻¹.

Durante todo o experimento, o fornecimento de água se deu por meio de colocação manual nos recipientes (pratos) colocados sob cada um dos vasos, e em situações de alta concentração de sais na superfície do solo, a água passava a ser aplicada diretamente ao solo. Em ambas as situações, a quantidade fornecida era suficiente para que houvesse água disponível no solo em valores próximos a 80% da capacidade de campo.

3.4. Experimento 2

3.4.1. Instalação

O segundo experimento foi conduzido em casa de vegetação, durante um período de 45 dias, com amostras de solo retiradas de um horizonte B de um solo classificado como Latossolo Vermelho Acriférico típico (EMBRAPA, 2009), textura muito argilosa, cuja caracterização química e física está apresentada na tabela 3.

TABELA 3. Caracterização química e física das amostras de um solo classificado como Latossolo Vermelho Acriférico típico.

| pH H ₂ O | P | K | Al ³⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | SB | t | T | V | m | M.O. |
|------------------------|---------------------------------|-----|--|------------------|------------------|--------------------------------|--------|------|---------|------|----------------------|
| | ----- mg dm ⁻³ ----- | | ----- cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | | -- % -- | | dag kg ⁻¹ |
| 5,2 | 1,6 | 6,0 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,42 | 0,52 | 4,52 | 9,0 | 19,0 | 2,1 |
| B | Cu | Fe | Mn | Zn | Areia | Silte | Argila | | | | |
| | ----- mg dm ⁻³ ----- | | | | | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | | |
| 0,04 | 4,1 | 12 | 9,2 | 0,3 | 42 | 219 | 739 | | | | |

P, K = (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) P disponível (extrator Mehlich-1); Ca, Mg, Al, (KCl 1 mol L⁻¹); H+Al = (Solução Tampão – SMP a pH 7,5); SB = Soma de Bases; t = CTC efetiva; T = CTC a pH 7,0; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio (EMBRAPA, 1997), M.O. = Método Colorimétrico. B = (BaCl₂ . 2H₂O 0,125% à quente); Cu, Fe, Mn, Zn = (DTPA 0,005 mol L⁻¹ + TEA 0,1 mol L⁻¹ + CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ a pH 7,3).

As amostras de solo depois de coletadas foram peneiradas e em seguida submetidas a um processo de incubação, por 30 dias dentro de vasos de plástico, com volume de 5L, contendo 5 kg de solo, com os corretivos CaCO₃ (P. A.) e MgSO₄ (P. A.) nas doses de 1,5 g kg de solo⁻¹ e 0,56 g kg de solo⁻¹ respectivamente. Para que ocorresse a reação destes corretivos, estas amostras de solo foram mantidas com umidade próxima de 80% da capacidade de campo com a adição de água na proporção de 440 mL kg de solo⁻¹ em cada vaso e reposição semanal.

3.4.2 Condução

Após a mistura com os tratamentos, o solo nos vasos recebeu água (440 mL kg de solo⁻¹) para que em seguida fosse feita a semeadura de 10 sementes de milho (híbrido DKB 390 VTPRO).

Aos 7 DAS foi feito o desbaste das plantas, deixando cinco em cada vaso e a partir daí, semanalmente era aplicada a adubação nitrogenada de cobertura na dose de 200 kg ha⁻¹ N, utilizando-se (NH₄)₂SO₄ em solução com concentração de 50 g L⁻¹ e volume de aplicação de 10 mL kg de solo⁻¹.

Durante todo o experimento, o fornecimento de água se deu por meio de colocação manual nos recipientes (pratos) colocados embaixo de cada vaso, e em situações de alta concentração de sais na superfície do solo, a água passava a ser aplicada diretamente ao solo. Em ambas as situações, a quantidade fornecida era suficiente para que houvesse água disponível no solo próximo a capacidade de campo.

3.5. Avaliações

Ao final dos experimentos (28 dias para o primeiro, e 45 dias para o segundo) as plantas foram cortadas e, em seguida acondicionadas em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 60° C até atingirem peso constante, cinco dias após o corte. Depois de secas, as plantas foram submetidas à pesagem de matéria seca em balança de precisão com duas casas decimais.

Para as análises de B, Cu, Mn e Zn na parte aérea, o material vegetal foi moído em moinho tipo Willey, e acondicionado em sacos plásticos até a realização das análises as quais seguiram a metodologia descrita por Malavolta et al., 1997.

Utilizando os resultados de massa seca e de micronutrientes na parte aérea foram calculados a quantidade de B, Cu, Mn e Zn acumulados.

Ainda, com o auxílio de um trado para vasos, foram coletadas também amostras de solo, as quais foram secas ao ar e posteriormente peneiradas e acondicionadas em sacos plásticos. As análises B, Cu, Mn e Zn no solo foram feitas de acordo com a metodologia descrita Raij et al., 2001.

3.6. Análises estatísticas

Com o auxílio do programa estatístico ASSISTAT versão 7.6 beta (ASSIS, 2012) os resultados dos tratamentos qualitativos foram submetidos à análise de variância. Em caso de significância do teste de F as médias foram comparadas entre si pelos testes de Tukey e Dunnett a 0,01 e 0,05 de significância, respectivamente.

Os resultados dos tratamentos quantitativos foram também submetidos à análise de variância, e, em caso de significância do teste de F, foram feitas, com o auxílio do programa estatístico SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2008), regressões a 0,05 de significância, as quais constam nos gráficos apresentados nos resultados.

As correlações entre os teores de micronutrientes no solo e seu acúmulo na parte aérea, foram feitas utilizando-se o programa estatístico SPSS.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento 1

4.1.1. Teores de micronutrientes no solo

4.1.1.1 Boro

Os teores de B no solo somente sofreram acréscimo, em relação à testemunha, em função da aplicação da maior dose utilizada no experimento ($2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de B), independente do tipo de fertilizante utilizado (Tabela 4).

A análise de boro mostra que o seu nível inicial no solo pode ser classificado como “MUITO BAIXO” (menor que $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$), de acordo com Alvarez et al., (1999), o que favorece o incremento, de $0,07 \text{ mg dm}^{-3}$ para até $0,24 \text{ mg dm}^{-3}$, para as maiores doses aplicadas, pois, devido ao baixo valor inicial de B, o solo comporta-se como responsivo à adubação com doses crescentes do nutriente.

TABELA 4. Teores de boro (B) nas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico 28 dias após a aplicação.

| Dose de B aplicada no solo ----- kg ha^{-1} ----- | B no solo | | Média |
|---|----------------------|----------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | |
| 0,0 | 0,07 | | |
| 0,1 | $0,08^{\text{ns}}$ a | $0,08^{\text{ns}}$ a | 0,08 |
| 0,3 | $0,06^{\text{ns}}$ a | $0,08^{\text{ns}}$ a | 0,07 |
| 0,6 | $0,09^{\text{ns}}$ a | $0,08^{\text{ns}}$ a | 0,08 |
| 1,2 | $0,06^{\text{ns}}$ b | $0,13^{\text{ns}}$ a | 0,09 |
| 2,4 | $0,24^*$ a | $0,15^*$ b | 0,20 |
| Média | 0,11 | 0,10 | |

CV % = 35,9; DMS Fonte = 0,02; DMS Dunnett = 0,07

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

A comparação entre os fertilizantes mostra que maiores teores de B no solo foram obtidos pela aplicação de $1,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de B, na forma de revestimento de grânulos e de $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de B, na forma de mistura. Para as demais doses não houve diferença entre os fertilizantes (Tabela 4).

Nota-se, no entanto, que somente a maior dose de boro obtida pela aplicação do fertilizante como mistura foi capaz de superar os teores de boro no solo obtidos pela aplicação do fertilizante como revestimento de grânulos (Figura 1).

Ainda pode-se observar o incremento do teor de boro no solo em função da sua aplicação em doses crescentes, para os dois fertilizantes estudados. Nas duas situações, o aumento da dose de boro aplicada aumenta a disponibilidade desse elemento no solo (Figura 1).

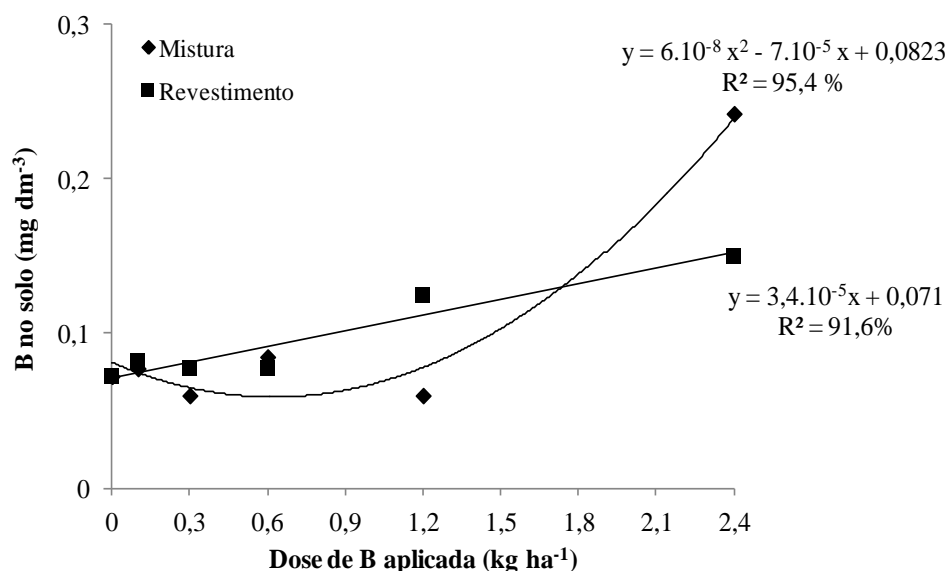


FIGURA 1. Teores de boro nas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico em função da aplicação de doses crescentes de boro, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

4.1.1.2. Cobre

As doses de micronutrientes utilizadas não foram capazes de causar incremento nos teores de Cu no solo quando comparados com a testemunha. Do mesmo modo, não houve também diferença entre a forma com que os micronutrientes foram adicionados ao fertilizante e seus teores no solo (Tabela 5).

A falta de incremento nos teores de Cu no solo em função da aplicação dos fertilizantes testados pode ser explicada pelo fato de o seu teor inicial ser considerado “MÉDIO”, segundo classificação proposta por Alvarez et al. (1999), o que, como é esperado, gera pequena resposta à adubação com cobre, independente da forma aplicada, em comparação à possíveis respostas de um solo deficiente.

TABELA 5. Teores de cobre (Cu) nas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico 28 dias após a aplicação.

| Dose de Cu aplicada no solo | Cu no solo | | Média |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | ----- mg dm ⁻³ ----- | | |
| 0,0 | 0,8 | | |
| 0,3 | 0,9 ^{ns} | 0,9 ^{ns} | 0,9 |
| 0,6 | 0,9 ^{ns} | 0,8 ^{ns} | 0,8 |
| 1,2 | 0,8 ^{ns} | 0,9 ^{ns} | 0,9 |
| 2,4 | 0,8 ^{ns} | 0,9 ^{ns} | 0,8 |
| 4,8 | 0,8 ^{ns} | 0,9 ^{ns} | 0,9 |
| Média | 0,8 a | 0,9 a | |

CV % = 14,8; DMS Fonte = 0,08; DMS Dunnett = 0,26

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

4.1.1.3. Manganês

Os teores de Mn no solo, mesmo sem a adubação com esse micronutriente se mostraram em níveis classificados como “BOM” segundo Alvarez et al. (1999), o que fez com que de modo semelhante ao cobre, não fossem detectados incrementos nos teores de Mn no solo em função da aplicação dos fertilizantes (Tabela 6).

TABELA 6. Teores de manganês (Mn) nas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico 28 dias após a aplicação.

| Dose de Mn aplicada no solo | Mn no solo | | Média |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | ----- mg dm ⁻³ ----- | | |
| 0,0 | 8,2 | | |
| 0,3 | 10,9 ^{ns} | 10,5 ^{ns} | 10,7 |
| 0,6 | 9,1 ^{ns} | 8,9 ^{ns} | 9,0 |
| 1,2 | 12,3 ^{ns} | 10,7 ^{ns} | 11,5 |
| 2,4 | 8,3 ^{ns} | 13,4 ^{ns} | 10,8 |
| 4,8 | 8,7 ^{ns} | 12,8 ^{ns} | 10,8 |
| Média | 0,11 a | 0,10 a | |

CV % = 26,0; DMS Fonte = 1,8; DMS Dunnett = 5,7

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Os teores satisfatórios de manganês no solo, mesmo onde não houve adubação com esse micronutriente (Tabela 6), são superiores aos detectados antes da aplicação dos fertilizantes (Tabela 2). Isso poderia ser explicado pelo fato de ânions associados com fertilizantes potássicos, por exemplo, terem efeito na solubilidade, mobilidade e

disponibilidade do Mn (GRAHAM et al., 1988). Jackson et al., (1966 apud GRAHAM et al., 1988) observaram que aplicações de KCl aumentaram o teor de Mn em plantas de milho doce cultivadas em solo ácido. Westermann et al., (1971 apud GRAHAM et al., 1988) também observaram maior liberação de Mn quando houve aplicação de KCl em solo ácido.

O aumento nos teores de Mn no solo era esperado, no entanto acredita-se que em um solo responsivo à aplicação de manganês, a forma de revestimento de grânulos apresente melhores resultados mesmo a fonte de Mn sendo de baixa solubilidade como o MnO. Isso porque, a baixa eficiência ocasionada pela baixa solubilidade pode ser revertida através da fina moagem (MASCAGNI; COX, 1985 apud GRAHAM et al., 1988; MORTVEDT; GIORDANO, 1970 apud GRAHAM et al., 1988) à qual o MnO foi submetido antes de revestir os grânulos de NPK.

4.1.1.4. Zinco

O Zn é o micronutriente mais limitante à produção do milho, sendo a sua deficiência muito comum nos solos de cerrado, os quais geralmente apresentam baixo teor de zinco no material de origem (COELHO et al., 2011), o que se confirma no Latossolo Vermelho distrófico utilizado nesse experimento, o qual apresenta “BAIXO” teor de zinco disponível de acordo com Alvarez et al., (1999), conforme apresentado na tabela 7.

TABELA 7. Teores de zinco (Zn) nas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico 28 dias após a aplicação.

| Dose de Zn aplicada no solo | Zn no solo | | Média |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------|
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | Mistura | Revestimento | |
| | | mg dm ⁻³ | |
| 0,0 | | 0,7 | |
| 0,4 | 0,7 ^{ns} a | 1,0 ^{ns} a | 0,8 |
| 0,9 | 0,7 ^{ns} a | 1,0 ^{ns} a | 0,9 |
| 1,8 | 0,7 ^{ns} a | 0,9 ^{ns} a | 0,8 |
| 3,6 | 0,7 ^{ns} b | 2,3 [*] a | 1,5 |
| 7,2 | 0,8 ^{ns} b | 2,1 [*] a | 1,4 |
| Média | 0,7 | 1,5 | |

CV % = 35,8; DMS Fonte = 0,24; DMS Dunnett = 0,77

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

A aplicação do fertilizante contendo micronutrientes na forma de revestimento de grânulos foi capaz de gerar incremento nos teores de Zn no solo, para as doses de 3,6 e 7,2 kg ha⁻¹ de Zn (Tabela 7). Essas foram as doses capazes de elevar os teores de Zn no solo, passando-os de “BAIXO” (menor que 0,9 mg dm⁻³), para “ALTO” (acima de 2,0 mg dm⁻³), de acordo com a classificação proposta por Alvarez et al., (1999), o que, certamente, favoreceu o desenvolvimento das plantas.

Em relação às fontes testadas, a adubação com os micronutrientes no revestimento de grânulos resultou em teores de zinco no solo superiores, tanto para as doses anteriormente citadas quanto para o teor médio (mais de duas vezes superior), aos atingidos pela aplicação dos micronutrientes na forma de mistura (Tabela 7).

Esses resultados podem ser relacionados aos obtidos por Galvão (1986) que a partir de uma série de experimentos, encontrou que uma única aplicação de 6,0 kg ha⁻¹ de Zn a lanco e incorporado em área total, já foi suficiente para quatro colheitas de milho em um solo classificado como Latossolo Vermelho-escuro Argiloso, o que demonstra que essa dose apresenta um prolongado efeito residual da adubação com este micronutriente. Além disso, o autor não observou diferença entre óxido, sulfato e fritas como fontes de Zn para o milho, o que permite inferir que o óxido, mesmo tendo menor solubilidade em água, pode ser uma boa fonte desse micronutriente.

A aplicação de doses crescentes de zinco aumentou os teores desse nutriente no solo, no entanto, esse comportamento foi observado somente para o formulado contendo o micronutriente no revestimento de grânulos (Figura 2). Observa-se ainda que o incremento de zinco no solo atinge maior valor para a aplicação de 3,6 kg ha⁻¹ de Zn na forma de revestimento de grânulos (Figura 2).

O incremento dos teores de Zn no solo, quando foi aplicado o NPK com micronutrientes no revestimento dos grânulos, pode ser explicado pelo o que afirma Mortverdt (1993) ao dizer que a forma granulada do óxido de zinco (semelhante à utilizada no fertilizante com micronutrientes misturados ao NPK), tem eficiência bastante inferior à do mesmo fertilizante na forma de pó, (forma em que os micronutrientes se encontravam no revestimento dos grânulos), devido à baixa solubilidade em água dessa fonte. A explicação seria o fato de que para produtos com baixos teores de zinco solúvel em água (os óxidos utilizados nos fertilizantes estudados), a menor superfície específica do fertilizante granulado implica em redução da sua eficiência (MORTVEDT; GILKES, 1993).

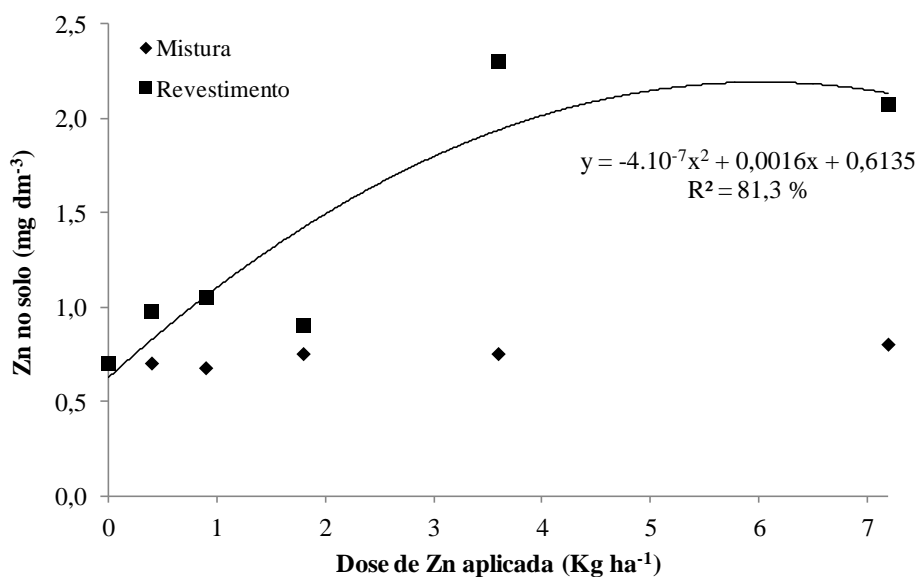


FIGURA 2. Teores de zinco nas amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico em função da aplicação de doses crescentes de zinco, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

4.1.2. Massa seca

Os resultados de massa seca mostram que somente a aplicação de 2400 kg ha⁻¹ do fertilizante contendo micronutrientes revestindo os grânulos foi capaz de produzir plantas de milho com massa seca superior à das plantas do tratamento sem a aplicação de micronutrientes (Tabela 8).

TABELA 8. Massa seca da parte aérea de milho colhido 28 dias após a semeadura.

| B | Dose | | | Massa Seca | | Média |
|---------------------------------|------|-----|-----|----------------------------------|--------------------|-------|
| | Cu | Mn | Zn | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | | | | ----- g vaso ⁻¹ ----- | | |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 26,1 | | |
| 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 25,7 ^{ns} | 27,7 ^{ns} | 26,7 |
| 0,3 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 26,3 ^{ns} | 27,2 ^{ns} | 26,8 |
| 0,6 | 1,2 | 1,2 | 1,8 | 27,5 ^{ns} | 29,0 ^{ns} | 28,3 |
| 1,2 | 2,4 | 2,4 | 3,6 | 26,6 ^{ns} | 28,2 ^{ns} | 27,4 |
| 2,4 | 4,8 | 4,8 | 7,2 | 26,6 ^{ns} | 29,8 * | 28,2 |
| Média | | | | 26,5 b | 28,4 a | |

CV % = 6,0; DMS Fonte = 1,07; DMS Dunnett = 3,38

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância;

* significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Em relação ao tipo de fertilizante, os resultados mostram que as plantas que receberam a aplicação de micronutrientes na forma de revestimento dos grânulos de NPK, produziram massa seca superior aquelas adubadas com micronutrientes na forma de mistura (Tabela 8).

Esse resultado difere dos encontrados por Korndörfer et al. (1987), que testaram formas de adição de Zn, como óxido e sulfato, ao fertilizante 5-30-15 e observaram resultados semelhantes, para as duas fontes de zinco, na produção de massa seca de parte aérea de milho conduzido em casa de vegetação. Korndörfer et al. (1995), também não encontraram diferença na produção de milho em tratamentos sem Zn e com Zn aplicado como óxido ou FTE incorporado ou misturado ao formulado 4-30-10.

A aplicação de doses crescentes do fertilizante contendo grânulos de NPK revestidos por micronutrientes gerou incremento na produção de massa seca das plantas, o que não foi observado para os micronutrientes na forma de mistura (Figura 3).

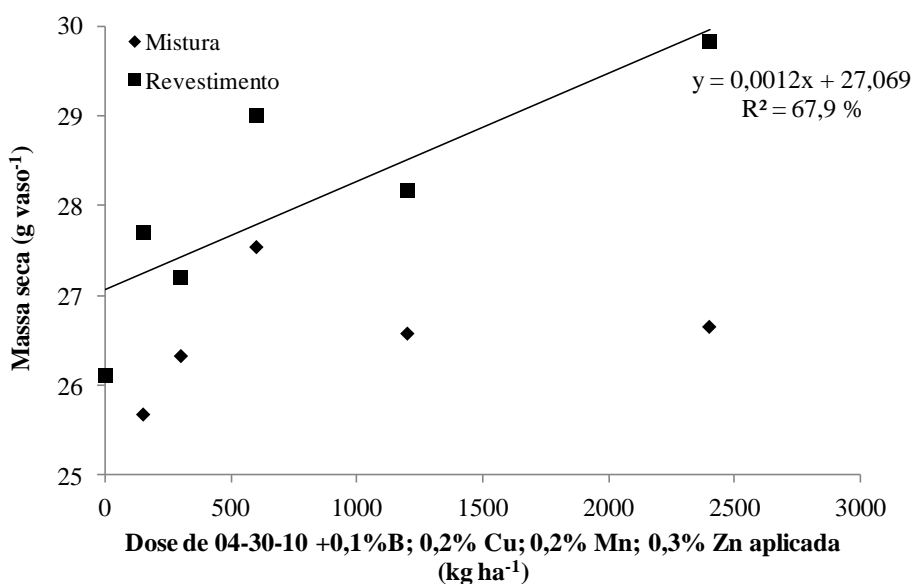


FIGURA 3. Massa seca de plantas de milho colhidas 28 dias após semeadura em função da aplicação de doses crescentes de micronutrientes, obtidas de fertilizantes contendo-os na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

4.1.3. Concentração e acúmulo de micronutrientes na parte aérea

4.1.3.1. Boro

Os resultados para a concentração de B na parte aérea das plantas de milho, variaram de 5,6 mg kg⁻¹ a 27,2 mg kg⁻¹ de B, sendo as doses de 1,2 e 2,4 kg ha⁻¹ de B adicionado ao formulado NPK na forma de mistura e de 2,4 kg ha⁻¹ de B adicionado na forma de revestimento as que geraram resultados superiores ao das plantas que não foram adubadas com esse micronutriente (Tabela 9). Observa-se também que a concentração de B na parte aérea de 27,2 mg kg⁻¹ para a maior dose de micronutrientes na forma de mistura (2,4 kg ha⁻¹) e também seu teor médio (12,3 mg kg⁻¹) foram superiores ao revestimento de grânulos com micronutrientes (Tabela 9).

As concentrações de B na parte aérea encontradas em função da aplicação da maior dose de cada uma das fontes são as únicas que se classificam como adequadas para a cultura do milho (maiores que 15 mg kg⁻¹) de acordo com Bull, (1993) e os demais, se encontram abaixo dos valores de referência.

TABELA 9. Concentração e acúmulo de boro (B) na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após a semeadura.

| Dose de B aplicada no solo | Concentração de B | | | B acumulado | | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------|-----------------------------------|-----------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | Média | Mistura | Revestimento | Média |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | ----- µg vaso ⁻¹ ----- | | |
| 0,0 | | 6,1 | | | 159,1 | |
| 0,1 | 5,7 ^{ns} a | 7,3 ^{ns} a | 6,5 | 146,9 ^{ns} a | 201,1 ^{ns} a | 174,0 |
| 0,3 | 6,1 ^{ns} a | 5,6 ^{ns} a | 5,9 | 160,4 ^{ns} a | 152,4 ^{ns} a | 156,4 |
| 0,6 | 10,6 ^{ns} a | 7,4 ^{ns} a | 9,0 | 295,3 ^{ns} a | 212,2 ^{ns} a | 253,8 |
| 1,2 | 11,8 * a | 11,1 ^{ns} a | 11,4 | 314,9 * a | 313,0 * a | 313,9 |
| 2,4 | 27,2 * a | 16,0 * b | 21,6 | 722,2 * a | 474,5 * b | 598,3 |
| Média | 12,3 | 9,5 | | 327,9 | 270,6 | |

Concentração: CV % = 24,4; DMS Fonte = 3,8; DMS Dunnett = 5,3

Acumulado: CV % = 24,2; DMS Fonte = 44,9; DMS Dunnett = 141,9

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância;

* significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Somente a aplicação de 1,2 e 2,4 kg ha⁻¹ de B acarretou acúmulo desse elemento em valores superiores aos acumulados pelas plantas cultivadas no solo que não recebeu aplicação desse micronutriente (Tabela 9). Na comparação entre fontes, o boro na forma de mistura foi mais acumulado tanto na maior, quanto na média das doses aplicadas (Tabela 9).

Para os dois fertilizantes estudados, o aumento da dose de boro resultou no aumento da sua concentração na parte aérea das plantas. Porém para cada um kg ha^{-1} de boro adicionado como forma de mistura aos grânulos de NPK (Figura 4).

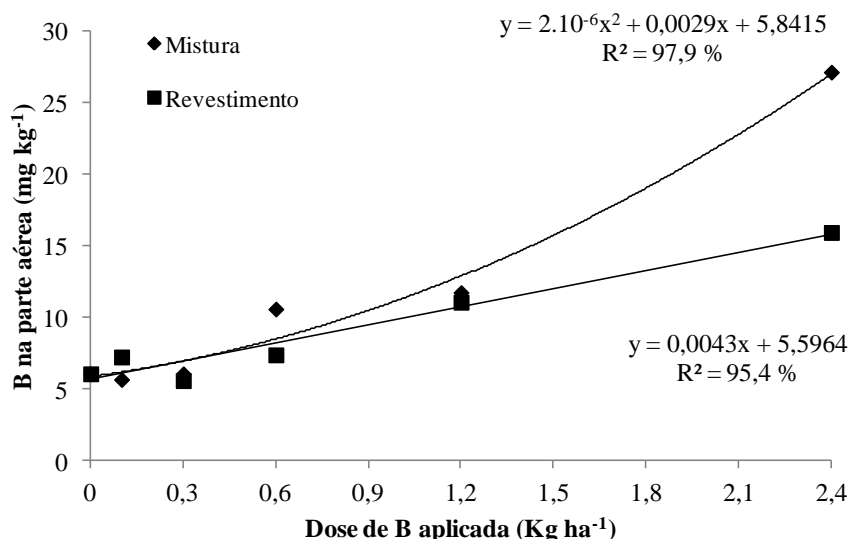


FIGURA 4. Concentração de boro na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após semeadura, em função da aplicação no solo de doses crescentes de boro obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

A quantidade de boro acumulada na parte aérea de milho, também sofreu aumento de acordo com a quantidade de boro aplicada ao solo. Isso ocorreu independentemente da forma que o B foi adicionado ao fertilizante (Figura 5). No entanto, nota-se que quando as plantas de milho receberam B na forma de mistura de grânulos, a quantidade de B acumulado na sua parte aérea foi maior do que quando receberam a fertilização de B feita na forma de revestimento de grânulos. O incremento de B acumulado para cada um kg ha^{-1} de boro aplicado nessa forma (mistura) é cerca de 100 unidades superior, a partir da aplicação de $0,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de B, no entanto, nas doses menores do que essa, o comportamento dos fertilizantes é semelhante (Figura 5).

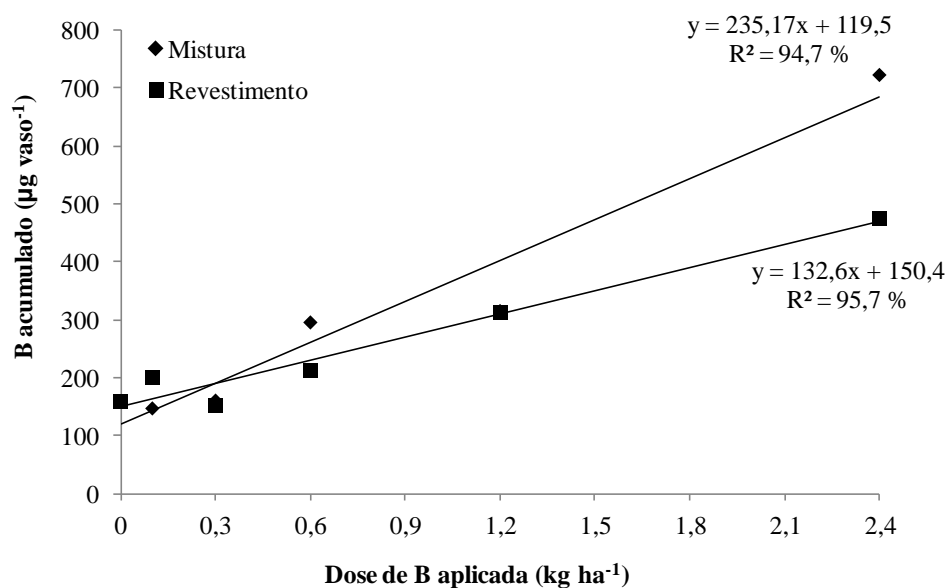


FIGURA 5. Boro acumulado na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após semeadura em função da aplicação de doses crescentes de boro, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

4.1.3.2. Cobre

As concentrações de Cu na parte aérea das plantas de milho não foram influenciadas pelas doses utilizadas e nem pela forma com que esse micronutriente se encontrava nos fertilizantes, não havendo assim diferença entre os resultados (Tabela 10).

Já para o acúmulo de Cu, observou-se que o mesmo foi maior naquelas plantas de milho que receberam Cu na forma de revestimento de grânulos (Tabela 10).

Sendo assim, nota-se que, as doses de Cu não influenciaram a absorção e o acúmulo, mas a forma do fertilizante teve influência na quantidade de Cu acumulada (Tabela 10).

A aplicação de Cu no solo não alterou a concentração desse elemento nas plantas de milho, pois essa, mesmo nas plantas que não foram adubadas com Cu, estava em níveis aceitáveis para a cultura, os quais variam de 6 a 20 mg kg⁻¹ (BULL 1993; MARTINEZ et al., 1999).

TABELA 10. Concentração e acúmulo de cobre (Cu) na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após a semeadura.

| Dose de Cu aplicada no solo | Concentração de Cu | | Média | Cu acumulado | | Média |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------|-----------------------------------|---------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | ----- µg vaso ⁻¹ ----- | | |
| 0,0 | | 6,6 | | | 170,8 | |
| 0,3 | 6,2 ^{ns} | 7,1 ^{ns} | 6,7 | 158,9 ^{ns} | 196,5 ^{ns} | 177,7 |
| 0,6 | 6,5 ^{ns} | 7,2 ^{ns} | 6,9 | 171,9 ^{ns} | 194,8 ^{ns} | 183,4 |
| 1,2 | 6,8 ^{ns} | 6,6 ^{ns} | 6,7 | 187,6 ^{ns} | 190,1 ^{ns} | 188,9 |
| 2,4 | 6,6 ^{ns} | 6,1 ^{ns} | 6,3 | 175,0 ^{ns} | 170,7 ^{ns} | 172,9 |
| 4,8 | 6,3 ^{ns} | 6,1 ^{ns} | 6,2 | 168,4 ^{ns} | 182,1 ^{ns} | 175,3 |
| Média | 6,5 a | 6,6 a | | 172,4 b | 186,9 a | |

Concentração: CV % = 12,7; DMS Fonte = 0,53; DMS Dunnett = 1,7

Acumulado: CV % = 11,6; DMS Fonte = 13,5; DMS Dunnett = 42,5

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

4.1.3.3. Manganês

As doses de micronutrientes não influenciaram sua concentração na parte aérea das plantas de milho nem a quantidade de Mn acumulado (Tabela 11). Essa baixa resposta à adubação se justifica pelas concentrações elevadas de Mn na planta testemunha, as quais estão dentro do esperado (42 a 150 mg kg⁻¹) de acordo com Bull (1993).

TABELA 11. Concentração e acúmulo de manganês (Mn) na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após a semeadura.

| Dose de Mn aplicada no solo | Concentração de Mn | | Média | Mn acumulado | | Média |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------|-----------------------------------|----------------------|--------|
| | Mistura | Revestimento | | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | ----- µg vaso ⁻¹ ----- | | |
| 0,0 | | 114,0 | | | 2981,1 | |
| 0,3 | 109,5 ^{ns} | 97,3 ^{ns} | 103,4 | 2818,1 ^{ns} | 2698,8 ^{ns} | 2758,4 |
| 0,6 | 111,6 ^{ns} | 109,8 ^{ns} | 110,7 | 2935,1 ^{ns} | 2986,7 ^{ns} | 2960,9 |
| 1,2 | 118,9 ^{ns} | 105,4 ^{ns} | 112,1 | 3252,6 ^{ns} | 3038,7 ^{ns} | 3145,7 |
| 2,4 | 105,6 ^{ns} | 99,3 ^{ns} | 102,5 | 2806,3 ^{ns} | 2791,8 ^{ns} | 2799,1 |
| 4,8 | 114,2 ^{ns} | 96,7 ^{ns} | 105,5 | 3039,6 ^{ns} | 2880,6 ^{ns} | 2960,1 |
| Média | 111,9 a | 101,7 b | | 2970,3 a | 2879,3 a | |

Concentração: CV % = 8,5; DMS Fonte = 5,9; DMS Dunnett = 18,7

Acumulado: CV % = 9,4; DMS Fonte = 178,2; DMS Dunnett = 563,5

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

A forma como os micronutrientes estavam presentes nos fertilizantes aplicados ao solo influenciou a concentração de Mn, sendo as plantas de milho cultivadas em solo

adubado com micronutrientes na forma de mistura de grânulos as que absorveram maior concentração de Mn ($111,9 \text{ mg kg}^{-1}$) em comparação ao fornecimento de micronutrientes na forma de revestimento dos grânulos de NPK ($101,7 \text{ mg kg}^{-1}$) (Tabela 11). Esses resultados discordam daqueles citados por Mortvedt (1991) os quais mostram que o MnO granulado foi ineficiente para as culturas de aveia, milho e soja.

4.1.3.4. Zinco

As análises de Zn no tecido vegetal mostraram que somente as aplicações de 3,6 e $7,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de Zn na forma de revestimento de grânulos de NPK foram capazes de aumentar a concentração de Zn no interior da planta para $30,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn e $36,7 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn, respectivamente, sendo esses resultados superiores aos do tratamento controle ($22,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn) e também aos do fertilizante com micronutriente como mistura de grânulos, nas mesmas doses ($22,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn e $24,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn, respectivamente) (Tabela 12). Ainda as plantas cultivadas em solo que recebeu o fertilizante com Zn no revestimento de grânulos também apresentaram maior acúmulo de Zn (Tabela 12).

Esses resultados corroboram com os de Allen e Terman (1966) e Judy et al., (1964) que afirmam que o ZnO granulado foi ineficiente para o milho cultivado em casa de vegetação, e para a cultura do feijoeiro cultivada em campo, respectivamente.

TABELA 12. Concentração e acúmulo de zinco (Zn) na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após a semeadura.

| Dose de Zn aplicada no solo | Concentração de Zn | | Média | Zn acumulado | | Média |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha^{-1} ----- | ----- mg kg^{-1} ----- | | | ----- $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ----- | | |
| 0,0 | 22,1 | | | 577,7 | | |
| 0,4 | 22,4 ^{ns} a | 21,2 ^{ns} a | 21,8 | 573,5 ^{ns} a | 585,9 ^{ns} a | 579,7 |
| 0,9 | 23,1 ^{ns} a | 24,6 ^{ns} a | 23,9 | 608,2 ^{ns} a | 665,3 ^{ns} a | 636,7 |
| 1,8 | 23,9 ^{ns} a | 26,2 ^{ns} a | 25,1 | 657,7 ^{ns} a | 755,9 [*] a | 706,8 |
| 3,6 | 22,2 ^{ns} b | 30,5 [*] a | 26,4 | 589,5 ^{ns} b | 854,8 [*] a | 722,2 |
| 7,2 | 24,5 ^{ns} b | 36,7 [*] a | 30,6 | 654,1 ^{ns} b | 1093,9 [*] a | 874,0 |
| Média | 23,2 | 27,9 | | 616,6 | 791,2 | |

Concentração: CV % = 12,1; DMS Fonte = 1,9; DMS Dunnett = 6,2

Acumulado: CV % = 11,0; DMS Fonte = 49,2; DMS Dunnett = 155,6

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey à 0,01 de significância;

* significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

De maneira geral, as quantidades de zinco absorvidas foram elevadas e as concentrações encontradas na parte aérea são superiores ao mínimo adequado ao bom desenvolvimento de plantas de milho (15 mg kg^{-1}), segundo Bull (1993).

A aplicação de Zn no solo, na forma de revestimento de grânulos, nas doses de 1,8; 3,6 e $7,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de Zn foi capaz de gerar acúmulo desse elemento na parte aérea das plantas de milho em valores superiores ($755,9 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Zn, $854,8 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Zn e $1093,9 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Zn, respectivamente) às das plantas que não receberam Zn ($577,7 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Zn) (Tabela 12). Assim para as duas maiores doses de Zn aplicado na forma de revestimento de grânulos ocorreu maior acúmulo em comparação às mesmas doses de Zn misturado aos grânulos, com 589,5 e 654,1 microgramas de zinco acumuladas por vaso, respectivamente (Tabela 12).

A aplicação de doses crescentes de zinco na forma de revestimento de grânulos, diferentemente do formulado contendo zinco na forma de mistura, causou incremento na sua concentração na parte aérea (Figura 6), e o incremento do zinco aplicado no solo na forma de revestimento de grânulos, incrementou também o acúmulo de zinco na parte aérea, o que não foi observado para o zinco na forma de mistura de grânulos (Figura 7).

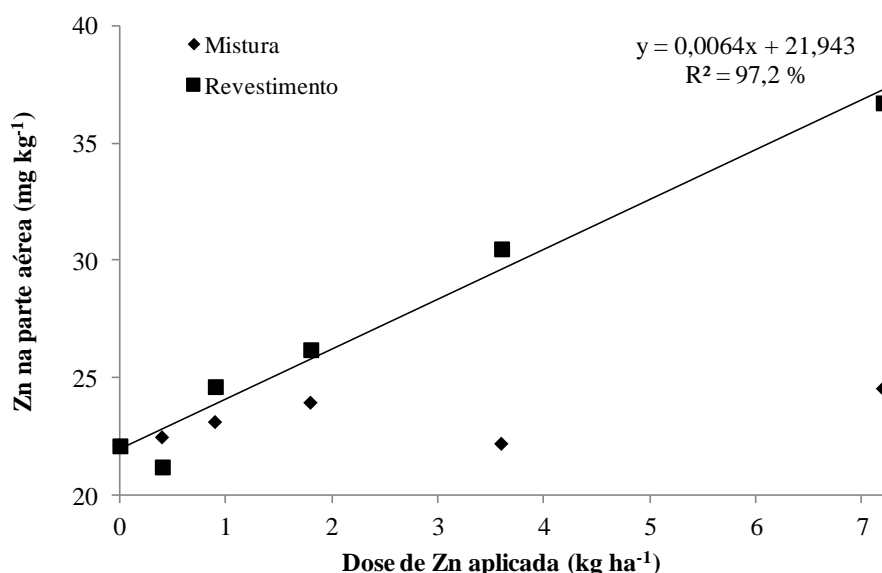


FIGURA 6. Concentração de zinco na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após semeadura, em função da aplicação no solo de doses crescentes de zinco obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

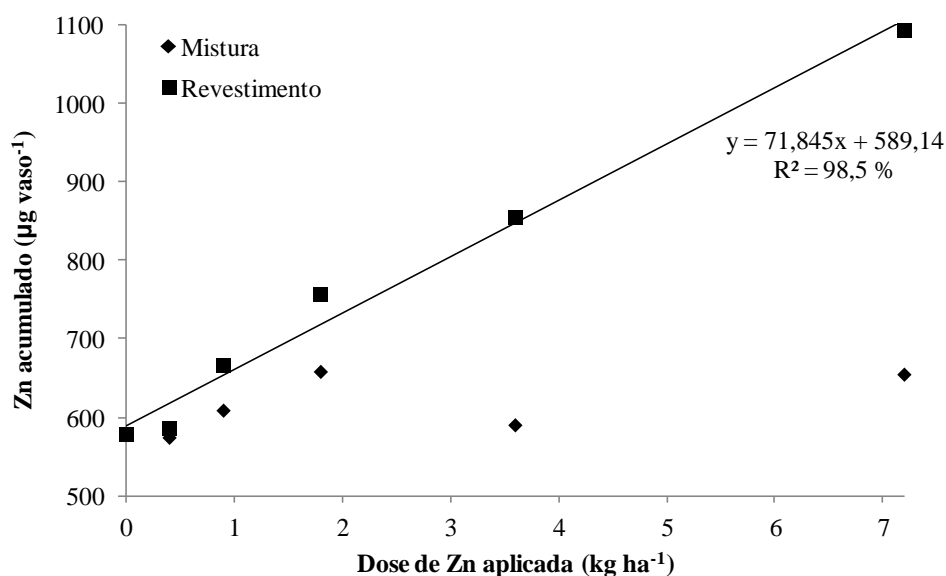


FIGURA 7. Zinco acumulado na parte aérea de plantas de milho colhidas 28 dias após semeadura em função da aplicação de doses crescentes de zinco, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

A maior absorção e o maior acúmulo de zinco proveniente do revestimento de grânulos, mesmo sendo a fonte o óxido de zinco, que apresenta baixa solubilidade, provavelmente se devem à inversão dessa característica causada pela presença dos superfosfatos na fórmula (YOUNG, 1969), o que ocorre porque o pH em torno do grânulo de superfosfato é muito ácido, consequentemente seu poder acidificante também (MORTDVEDT; GIORDANO, 1969), o que causam a disponibilização do micronutriente.

O mesmo é citado por Sauchelli (1967), que afirma que, no que se refere à disponibilidade para as plantas, é mais vantajoso utilizar não só o zinco, mas também o manganês em combinação com fertilizantes NPK em pH ácido.

4.1.4. Correlação entre os teores de micronutrientes no solo e o acumulado na parte aérea

Para relacionar as quantidades de micronutrientes aplicadas no solo com as quantidades absorvidas pelas plantas de milho, fez-se um estudo da correlação entre esses valores, o qual está demonstrado na tabela abaixo (Tabela 13).

Foram observadas correlações positivas e significativas para os teores de boro no solo e aqueles encontrados na parte aérea (Tabela 13). Isso indica que, para as duas formas de fertilizante contendo os micronutrientes, quanto maior o teor no solo, maior a absorção pela planta, o que pode ser explicado pelo seu teor inicial no solo estar abaixo do recomendado para essa cultura.

TABELA 13. Correlação entre os teores de micronutrientes encontrados no Latossolo Vermelho distrófico e o acumulado na parte aérea de plantas de milho, aos 28 dias após semeadura.

| Micronutrientes acumulados ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) | | Teores no solo (mg dm^{-3}) | | | | | | | |
|--|-----------|--|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| | | B | | Cu | | Mn | | Zn | |
| | | Mistura | Revestido | Mistura | Revestido | Mistura | Revestido | Mistura | Revestido |
| B | Mistura | 0,94* | - | - | - | - | - | - | - |
| | Revestido | - | 0,96* | - | - | - | - | - | - |
| Cu | Mistura | - | - | -0,55 | - | - | - | - | - |
| | Revestido | - | - | - | 0,09 | - | - | - | - |
| Mn | Mistura | - | - | - | - | 0,53 | - | - | - |
| | Revestido | - | - | - | - | - | -0,48 | - | - |
| Zn | Mistura | - | - | - | - | - | - | 0,58 | - |
| | Revestido | - | - | - | - | - | - | - | 0,83* |

* Correlação significativa a 0,05.

Para cobre e manganês, não existe correlação significativa para nenhum dos fertilizantes, o que pode ser explicado pelos teores no solo estarem acima das quantidades exigidas ou recomendadas.

No caso do zinco, há correlação positiva e significativa para o revestimento de grânulos, demonstrando que a absorção aumenta com incremento desse elemento no solo. A correlação não significativa para o zinco na forma de mistura de grânulos se deve à baixa capacidade de fornecimento do nutriente ao solo, e, também à maior sensibilidade da cultura à falta do elemento, sendo a forma de mistura, incapaz de suprir a exigência das plantas de milho com a aplicação das doses estudadas.

4.2. Experimento 2

4.2.1. Teores de micronutrientes no solo

4.2.1.1. Boro

Houve acréscimo nos teores de boro no solo, de $0,06 \text{ mg dm}^{-3}$ para até $0,20 \text{ mg dm}^{-3}$, somente para a aplicação das doses de 1,2 e $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de B, independente da forma com que esse elemento foi adicionado ao fertilizante, formas essas que não diferiram entre si quanto ao fornecimento do boro ao solo (Tabela 14).

TABELA 14. Teores de boro (B) nas amostras de um Latossolo Vermelho acriférico típico 45 dias após a aplicação.

| Dose de B aplicada no solo ----- kg ha^{-1} ----- | B no solo | | Média |
|---|---------------------------------|--------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | |
| | ----- mg dm^{-3} ----- | | |
| 0,0 | | 0,06 | |
| 0,1 | 0,06 ^{ns} | 0,09 ^{ns} | 0,08 |
| 0,3 | 0,06 ^{ns} | 0,08 ^{ns} | 0,07 |
| 0,6 | 0,11 ^{ns} | 0,11 ^{ns} | 0,11 |
| 1,2 | 0,14 [*] | 0,15 [*] | 0,14 |
| 2,4 | 0,20 [*] | 0,22 [*] | 0,21 |
| Média | 0,12 a | 0,13 a | |

CV % = 29,8; DMS Fonte = 0,02; DMS Dunnett = 0,07

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância;

* significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Por ser um elemento altamente solúvel e sem carga, o revestimento de grânulos com B não afeta sua disponibilização para o solo em comparação à forma granulada, assim, independente da forma com que o boro aparece no fertilizante, mesmo sendo uma fonte de baixa solubilidade, o aumento da dose aplicada causa maior disponibilização dele ao solo, conforme observado na figura 8.

Fontes de B não reagem quimicamente com as fontes de macronutrientes e, portanto não se nota essa menor eficiência para esse elemento. Sendo assim, fontes de boro não apresentam problemas em serem aplicadas juntamente com outros fertilizantes, desde que a mistura seja homogênea e a dose adequada para a cultura. No entanto, pode ser difícil se obter uma mistura homogênea porque as fontes de boro são, em sua maioria, cristalinas e apresentam tamanho médio de grânulos bastante inferior ao dos grânulos de NPK, o que facilita a ocorrência de segregação (GUPTA, 1993).

Esse resultado se assemelha ao encontrado por Abreu et al., (2004) onde as fontes de baixa solubilidade ulexita e fritas, ambas aplicadas na forma farelada apresentaram, num período inicial de 1 e 2 dias, teores de B menores que aqueles onde foi usado ácido bórico. No entanto, em três tipos de solo estudados e para períodos de tempo maior (15, 30 e 60 dias) as três fontes de B tiveram comportamentos similares.

Para ambas as formas de adição de boro aos fertilizantes, o incremento nos teores de boro no solo ocorreu, e isso pode ser devido à baixa quantidade inicial do elemento no solo, o que faz com que, o fertilizante aplicado consiga disponibilizar o nutriente às plantas (Figura 8). No entanto, os teores de boro no solo, mesmo sendo incrementados, permanecem em níveis classificados como “BAIXO”, de acordo com Alvarez et al., (1999), o que enfatiza a baixa disponibilidade de boro nesse solo.

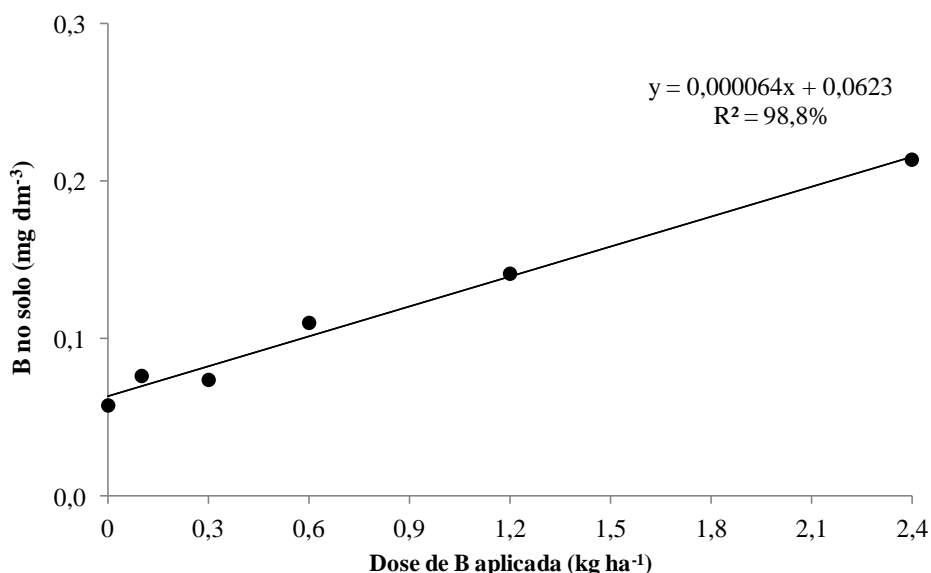


FIGURA 8. Média dos teores de boro nas amostras de um Latossolo Vermelho acriférrico típico em função da aplicação de doses crescentes de boro, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

4.2.1.2. Cobre

Para o Cu, o aumento das doses de nutrientes aplicadas não incrementou os teores encontrados no solo, os quais foram iguais aos do tratamento sem essa adubação. Isso foi observado tanto na aplicação de Cu via fertilizante na forma de mistura quanto

revestindo grânulos, embora essa segunda tenha disponibilizado maior quantidade de Cu de uma forma geral (Tabela 15).

Esse resultado se explica pelo fato do teor de Cu inicial de $3,8 \text{ mg dm}^{-3}$, ser superior ao nível de $1,8 \text{ mg dm}^{-3}$, o qual é considerado “ALTO” de acordo com a interpretação proposta por Alvarez et al., (1999), o que faz com que não haja resposta aos fertilizantes aplicados.

TABELA 15. Teores de cobre (Cu) nas amostras de um Latossolo Vermelho acriférico típico 45 dias após a aplicação.

| Dose de Cu aplicada no solo ----- kg ha^{-1} ----- | Cu no solo | | Média |
|---|---------------------------------|-------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | |
| | ----- mg dm^{-3} ----- | | |
| 0,0 | | 3,8 | |
| 0,3 | 3,8 ^{ns} | 3,9 ^{ns} | 3,9 |
| 0,6 | 3,7 ^{ns} | 4,1 ^{ns} | 3,9 |
| 1,2 | 3,8 ^{ns} | 4,1 ^{ns} | 3,9 |
| 2,4 | 3,8 ^{ns} | 4,1 ^{ns} | 4,0 |
| 4,8 | 3,9 ^{ns} | 4,2 ^{ns} | 4,0 |
| Média | 3,8 b | 4,1 a | |

CV % = 4,2; DMS Fonte = 0,1; DMS Dunnett = 0,3

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

4.2.1.3. Manganês

De maneira semelhante ao que ocorreu com o Cu, também não houve aumento nos teores de Mn no solo em função do aumento das doses do nutriente aplicadas e, os teores encontrados são iguais aos do tratamento que não recebeu a aplicação desse elemento (Tabela 16). O que foi observado para ambos os fertilizantes aplicados pode ser explicado pelos teores no solo, classificados como “BOM” de acordo com Alvarez et al., (1999), reduzirem a possibilidade de resposta à adubação com Mn (Tabela 16).

Não foi observada diferença nas doses de fertilizantes e nem na forma aplicada, provavelmente, pelo alto teor de Mn no solo. Era esperado que o revestimento de grânulos com micronutrientes fosse melhor em disponibilizar Mn, pois sua presença conjunta com fertilizantes ácidos, principalmente fosfatados, aumenta a eficiência do Mn aplicado (LINDSAY; STEPHENSON, 1959 apud GRAHAM et al., 1988). Esse aumento de eficiência é explicado por Lehr (1972 apud GRAHAM et al., 1988) que estudando a disponibilidade de manganês aplicado com fertilizantes fosfatados,

observou que há formação de compostos de menor solubilidade que retardam a oxidação do elemento no solo. Graham et al., (1988) afirmam que essas são as possíveis interações, negativa e positiva, respectivamente, que podem ocorrer entre o Mn e o fertilizante fosfatado ao qual foi adicionado.

TABELA 16. Teores de manganês (Mn) nas amostras de um Latossolo Vermelho acriférico típico 45 dias após a aplicação.

| Dose de Mn aplicada no solo ----- kg ha ⁻¹ ----- | Mn no solo | | Média |
|--|--------------------|-------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | |
| ----- mg dm ⁻³ ----- | | | |
| 0,0 | | 9,9 | |
| 0,3 | 8,7 ^{ns} | 9,6 ^{ns} | 9,2 |
| 0,6 | 9,0 ^{ns} | 8,4 ^{ns} | 8,7 |
| 1,2 | 11,2 ^{ns} | 9,1 ^{ns} | 10,1 |
| 2,4 | 8,7 ^{ns} | 9,0 ^{ns} | 8,8 |
| 4,8 | 8,7 ^{ns} | 9,7 ^{ns} | 9,2 |
| Média | 9,3 a | 9,2 a | |

CV % = 21,3; DMS Fonte = 1,3; DMS Dunnett = 3,9

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

4.2.1.4. Zinco

Maiores teores de zinco no solo (0,8 mg dm⁻³) foram observados quando o mesmo foi aplicado na maior dose e revestindo os grânulos do fertilizante (Tabela 17).

TABELA 17. Teores de zinco (Zn) nas amostras de um Latossolo Vermelho acriférico típico 45 dias após a aplicação.

| Dose de Zn aplicada no solo ----- kg ha ⁻¹ ----- | Zn no solo | | Média |
|--|---------------------|---------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | |
| ----- mg dm ⁻³ ----- | | | |
| 0,0 | | 0,3 | |
| 0,4 | 0,2 ^{ns} a | 0,3 ^{ns} a | 0,2 |
| 0,9 | 0,2 ^{ns} a | 0,3 ^{ns} a | 0,3 |
| 1,8 | 0,2 ^{ns} a | 0,3 ^{ns} a | 0,2 |
| 3,6 | 0,2 ^{ns} a | 0,3 ^{ns} a | 0,3 |
| 7,2 | 0,3 ^{ns} b | 0,8 [*] a | 0,5 |
| Média | 0,2 | 0,4 | |

CV % = 29,4; DMS Fonte = 0,05; DMS Dunnett = 0,2

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Somente para a forma de revestimento de grânulos, o aumento na dose aplicada implicou em aumento nos teores de Zn no solo, os quais foram também superiores aos obtidos pela aplicação do elemento na forma de mistura (Figura 9).

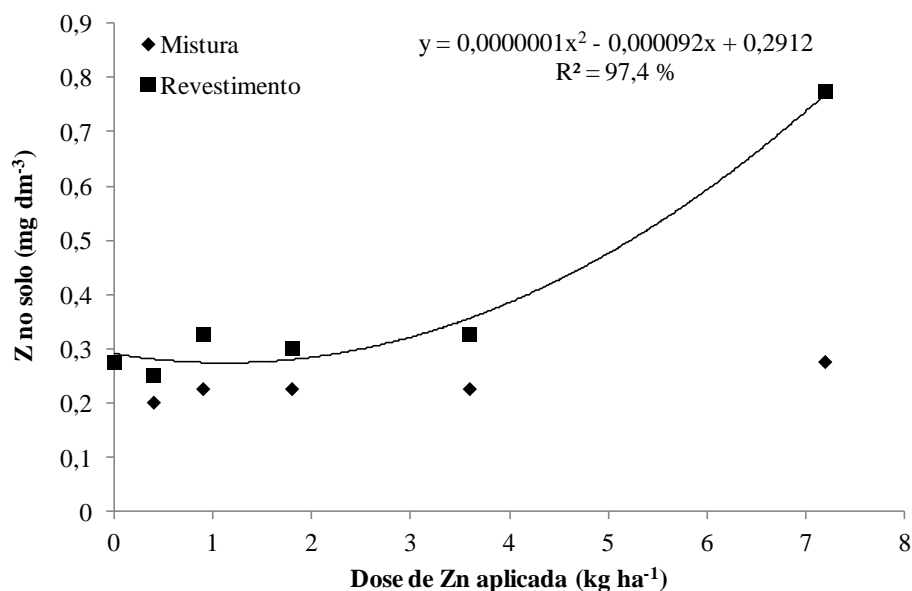


FIGURA 9. Teores de zinco nas amostras de um Latossolo Vermelho acriférrico típico em função da aplicação de doses crescentes de zinco, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

Uma possível explicação para o melhor desempenho do fertilizante contendo micronutrientes revestindo os grânulos de NPK pode ser extraída do estudo com trigo, de Ghosh (1990 apud MORTVEDT; GILKES, 1993), onde foi demonstrado que o Zn pulverizado sobre fertilizantes como MAP e DAP foi tão eficiente quanto o sulfato de zinco que é uma fonte de alta solubilidade, ao contrário das formas granuladas até mesmo da fonte solúvel, as quais tiveram eficiência baixa. A explicação atribuída pelo autor é que, provavelmente, ao redor do grânulo, apenas pequenos volumes de solo recebem o zinco, o que traz consequências também para o aproveitamento do micronutriente pelas plantas, em comparação com a adubação feita pela forma pulverizada.

4.2.2. Massa seca

A adubação com micronutrientes na forma de revestimento de grânulos, e nas duas maiores doses estudadas foi responsável por um incremento no crescimento das plantas de milho, em relação àquelas que não receberam micronutrientes (Tabela 18).

TABELA 18. Massa seca da parte aérea de milho colhido 45 dias após a semeadura.

| Dose | | | | Massa Seca | | Média |
|---------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------------|----------------------|-------|
| B | Cu | Mn | Zn | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | | | | ----- g vaso ⁻¹ ----- | | |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,6 | | |
| 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 6,6 ^{ns} a | 10,3 ^{ns} a | 8,5 |
| 0,3 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 6,8 ^{ns} b | 14,3 ^{ns} a | 10,2 |
| 0,6 | 1,2 | 1,2 | 1,8 | 7,1 ^{ns} a | 10,1 ^{ns} a | 8,6 |
| 1,2 | 2,4 | 2,4 | 3,6 | 6,1 ^{ns} b | 23,1 [*] a | 18,6 |
| 2,4 | 4,8 | 4,8 | 7,2 | 13,9 ^{ns} b | 27,3 [*] a | 20,6 |
| Média | | | | 8,1 | 17,0 | |

CV % = 33,4; DMS Fonte = 2,6; DMS Dunnett = 8,2

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância;

* significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

O crescimento das plantas de milho foi maior para a adubação com micronutrientes na forma de revestimento de grânulos, nas doses de 300, 1200 e 2400 kg ha⁻¹, em comparação ao fornecimento desses nutrientes na mistura de grânulos. De maneira geral, o formulado NPK revestido por micronutrientes proporcionou desenvolvimento de plantas mais de duas vezes superior (17,0 g vaso⁻¹) ao resultante da produção de plantas adubadas com os micronutrientes na forma de mistura de grânulos (8,1 g vaso⁻¹) (Tabela 18).

Amado (2005), por sua vez, não obteve diferença entre a produção de massa seca de milho conduzido em casa de vegetação comparando adubação sem micronutrientes e adubação com micronutrientes na forma de mistura ou revestimento de fertilizantes NPK.

O aumento da quantidade de micronutrientes aplicados no solo de cultivo, para ambos os fertilizantes, causou incremento de massa seca nas plantas de milho. No entanto, esse resultado foi melhor para a forma revestida do formulado, isso porque, para cada um kg ha⁻¹ desse fertilizante, o aumento de massa seca é três vezes superior ao obtido pelo formulado NPK com micronutriente na forma de mistura (Figura 10).

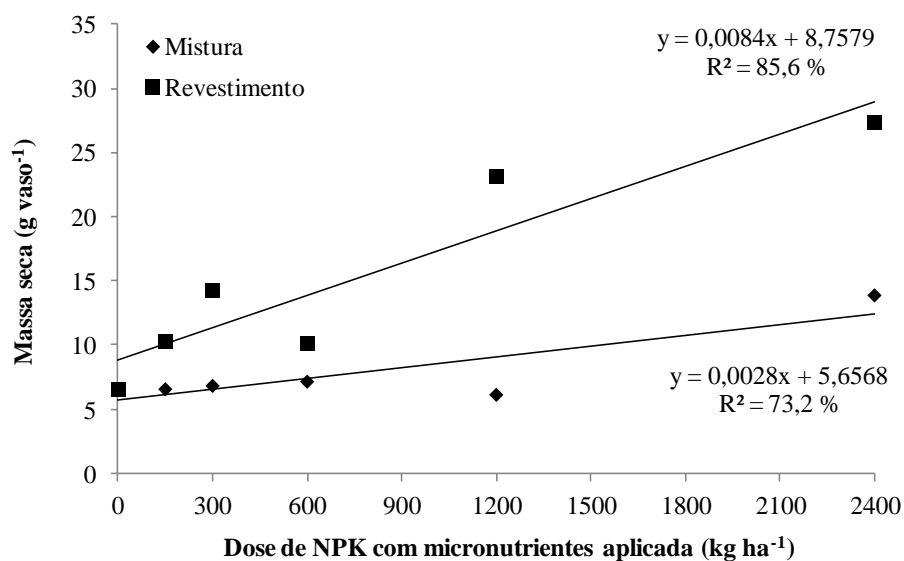


FIGURA 10. Massa seca de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura em função da aplicação de doses crescentes de micronutrientes, obtidas de fertilizantes contendo-os na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

O resultado visual da aplicação dos micronutrientes na forma de mistura com grânulos de NPK e no revestimento desses grânulos pode ser observado nas figuras 11 e 12, respectivamente.

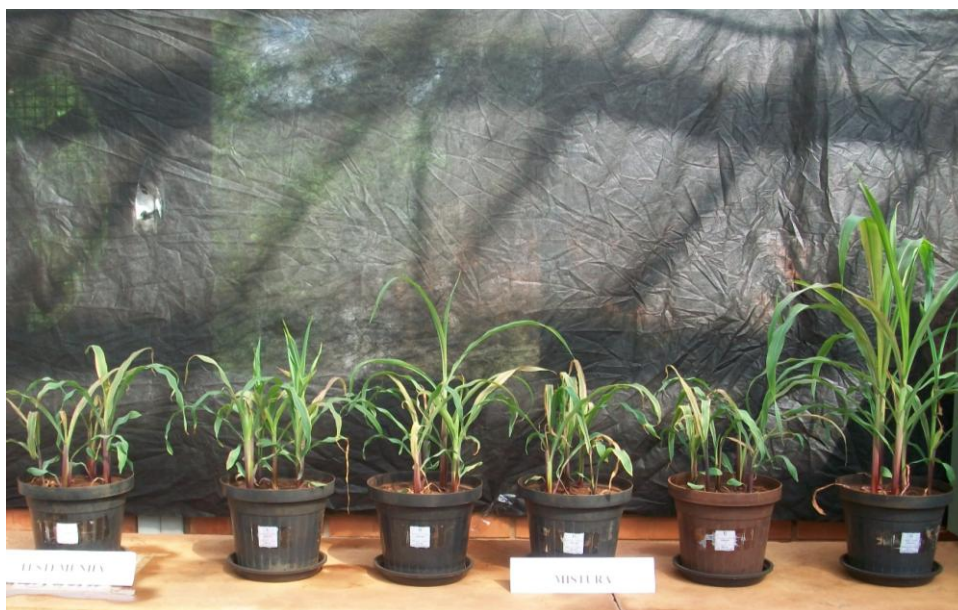


FIGURA 11. Desenvolvimento de plantas de milho aos 38 dias após semeadura em um Latossolo Vermelho acriférico típico adubado com doses crescentes de micronutrientes na forma de mistura de grânulos.

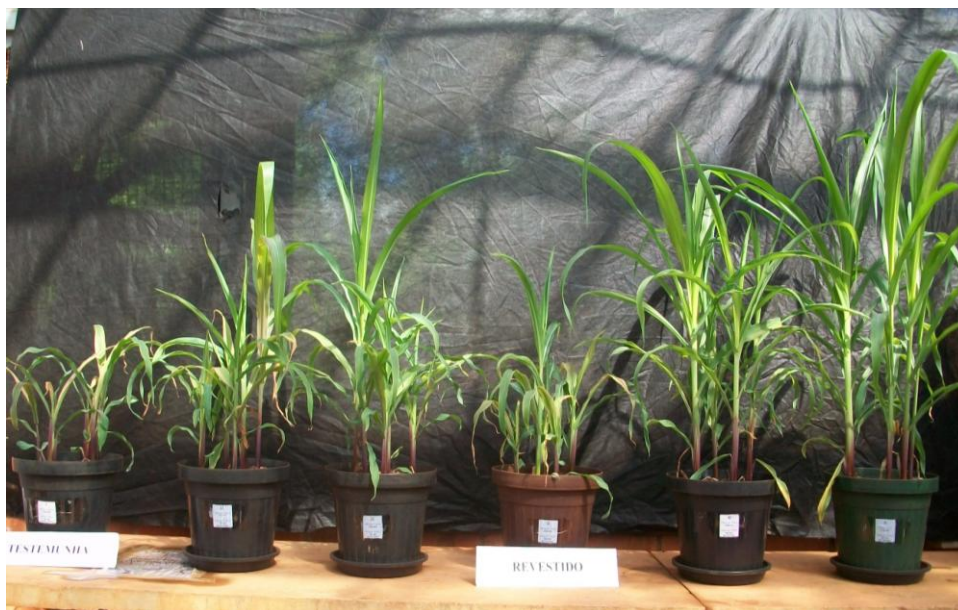


FIGURA 12. Desenvolvimento de plantas de milho aos 38 dias após semeadura em um Latossolo Vermelho acriférico típico adubado com doses crescentes de micronutrientes na forma de revestimento de grânulos.

4.2.3. Concentração e acúmulo de micronutrientes na parte aérea

4.2.3.1. Boro

A concentração de B na parte aérea das plantas de milho que receberam a aplicação desse micronutriente no solo de cultivo, na dose de $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de B foi superior à encontrada nas plantas que não receberam a adubação ($10,8 \text{ mg kg}^{-1}$). Esse fato foi observado para os fertilizantes contendo micronutrientes na forma de mistura e no revestimento dos grânulos, os quais atingiram valores de $21,9 \text{ mg kg}^{-1}$ de B e $18,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de B na parte aérea, respectivamente, sendo que, para as demais doses, não houve diferença da planta testemunha (Tabela 19).

Para o formulado na forma de mistura, somente houve diferença no acúmulo de B, o qual atingiu o valor de $314,6 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de B, quando se aplicou a maior dose ($2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de B), o que, para o revestimento, aconteceu com a dose 50% menor ($366,7 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de B) e se manteve para a dose de $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de B, alcançando $503,9$ microgramas de boro no vaso (Tabela 19).

O acúmulo de boro na parte aérea pelo seu uso no revestimento de grânulos foi superior tanto nas doses de $1,2$ e $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de B, com valores de $366,7 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de B e $503,9 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de B, respectivamente, quanto na média do tratamento ($239,1 \text{ } \mu\text{g vaso}^{-1}$ de B) (Tabela 19).

Nestas doses as quantidades ideais de boro às plantas de milho (15 a 20 mg kg⁻¹ de acordo com Bull, 1993) foram fornecidas, suprimindo assim a deficiência e proporcionando o melhor desenvolvimento das plantas.

TABELA 19. Concentração e acúmulo de boro (B) na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após a semeadura.

| Dose de B aplicada no solo | Concentração de B | | Média | B acumulado | | Média |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|-------|-----------------------------------|-----------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | | Mistura | Revestimento | |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | ----- µg vaso ⁻¹ ----- | | |
| 0,0 | 10,8 | | | 70,4 | | |
| 0,1 | 10,2 ^{ns} | 7,5 ^{ns} | 8,9 | 76,3 ^{ns} a | 74,3 ^{ns} a | 75,3 |
| 0,3 | 7,6 ^{ns} | 10,1 ^{ns} | 8,8 | 49,9 ^{ns} a | 129,4 ^{ns} a | 89,7 |
| 0,6 | 9,6 ^{ns} | 12,0 ^{ns} | 10,8 | 67,6 ^{ns} a | 121,5 ^{ns} a | 94,6 |
| 1,2 | 12,2 ^{ns} | 15,9 ^{ns} | 14,0 | 73,3 ^{ns} b | 366,7 [*] a | 220,1 |
| 2,4 | 21,9 [*] | 18,3 [*] | 20,1 | 314,6 [*] b | 503,9 [*] a | 409,2 |
| Média | 12,3 a | 12,8 a | | 116,4 | 239,1 | |

Concentração: CV % = 23,7; DMS Fonte = 1,9; DMS Dunnett = 5,9

Acumulado: CV % = 47,5; DMS Fonte = 51,6; DMS Dunnett = 163,2

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância;

* significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

O boro está relacionado a muitos processos fisiológicos da planta, principalmente síntese e estrutura da parede celular e integridade da membrana plasmática (CAKMAK; RÖMHELD, 1997).

Após a absorção e translocação pela planta, o B se deposita na folha e passa a ter muito pouca mobilidade, o que causa sintomas de deficiência nas partes jovens da planta (FAVARIN; MARINI, 2000).

Tais sintomas podem ser pequenas estrias cloróticas e aquosas no espaço internerval das folhas jovens, crescimento irregular do limbo foliar e enrugamento. Têm-se também folhas torcidas, tendendo a ficar quebradiças, cloróticas e mais tarde necróticas, ou com lesões translúcidas entre as nervuras. Em plantas novas ocorre o surgimento de brotações laterais pela morte dos meristemas apicais (TOKESHI, 1991; VITTI et al., 2011). Alguns desses sintomas de deficiência de boro que se manifestaram nas plantas de milho cultivadas no experimento são apresentados nas figuras a seguir.

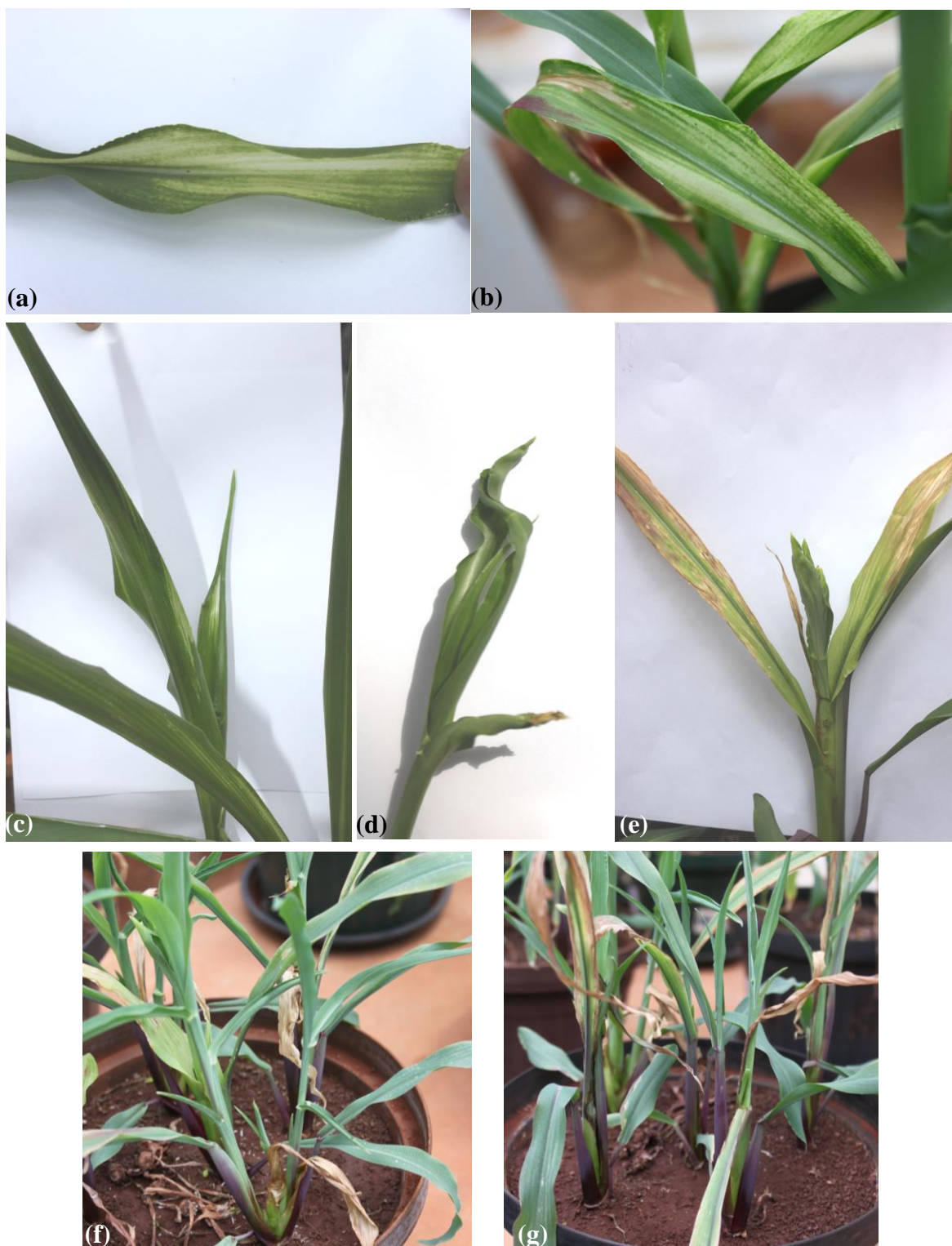


FIGURA 13. Deficiência de boro em milho aos 45 dias após semeadura em um Latossolo vermelho acriférico típico sem a aplicação de boro: estrias cloróticas e aquosas no espaço internerval de folhas jovens (a) e (b); crescimento irregular do limbo foliar e enrugamento (c) e (d); morte do meristema apical (e); brotações laterais (f) e (g).

Estes sintomas surgiram em detrimento da baixa quantidade inicial de B no solo e ainda, outro fator que pode ter causado deficiência desse micronutriente nas plantas pode ter sido a utilização de doses elevadas dos macronutrientes nitrogênio e potássio (GUPTA, 1993), pois as altas doses de N reduzem a absorção de boro pelas plantas, como demonstrado em um trabalho onde foram aplicados 224 kg ha^{-1} de N e houve redução na concentração de boro em folhas de beterraba (GUPTA, 1993).

Bubdine e Guzman (1969 apud GUPTA, 1993) observaram que aplicações excessivas de N e K intensificaram os sintomas de deficiência de boro em cultivares de aipo, mas quando os dois macronutrientes foram aplicados juntos, houve redução na severidade dos sintomas.

Para o caso do potássio, o incremento no fornecimento desse nutriente seria um dos responsáveis pela intensificação progressiva da deficiência de boro (EL KHOLI; HAMDY, 1977 apud GUPTA, 1993), o que estaria relacionado à influência do K no mecanismo de permeabilidade das células, provavelmente regulado pelo boro (GUPTA, 1993).

Para ambas as formas de adição de micronutrientes nos fertilizantes, o incremento nas doses de boro aplicadas causa aumento na concentração de boro absorvido pelas plantas de milho (Figura 14).

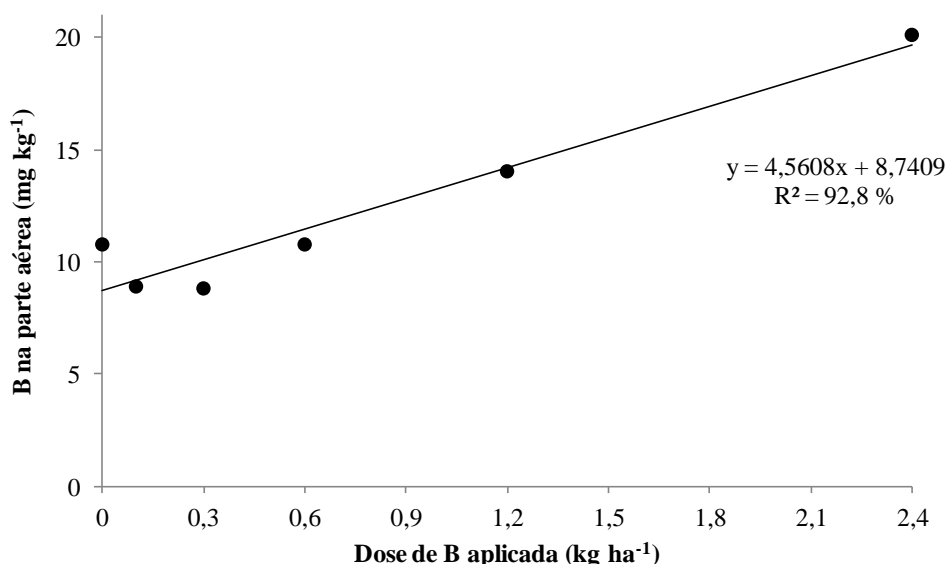


FIGURA 14. Média das concentrações de boro na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura, em função da aplicação no solo de doses crescentes de boro, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

Foi observado incremento no acúmulo de boro na parte aérea das plantas de milho, isso ocorreu quando essas foram adubadas com os dois tipos de fertilizantes estudados, mas observa-se que o revestimento de grânulos gera acúmulo maior, cerca de duas vezes, quando comparado ao micronutriente como mistura (Figura 15).

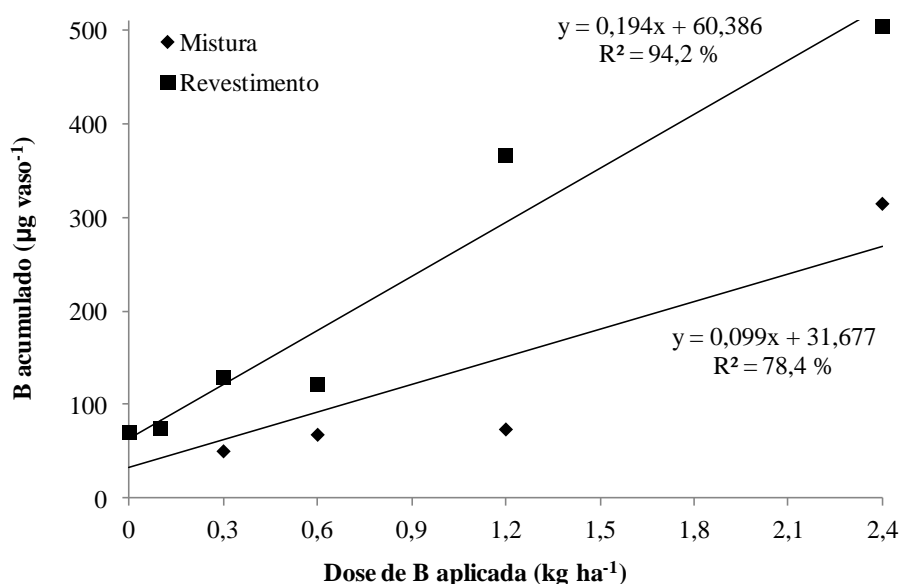


FIGURA 15. Boro acumulado na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura em função da aplicação de doses crescentes de boro, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

4.2.3.2. Cobre

As plantas de milho que cresceram nos solo adubado com 2,4 e 4,8 kg ha⁻¹ de Cu na forma de revestimento de grânulos tiveram um decréscimo na concentração desse elemento na parte aérea, com redução de 15,7 mg kg⁻¹ de B para 7,2 mg kg⁻¹ de B e 6,3 mg kg⁻¹ de B, respectivamente, e as plantas dos tratamentos com as menores doses de cobre tiveram concentração de Cu semelhante à da testemunha (14,3 mg kg⁻¹ de B a 15,7 mg kg⁻¹ de B). A comparação entre fontes mostra que houve maior absorção (14,5 mg kg⁻¹ de B) do Cu, quando este foi aplicado na forma de mistura com o formulado NPK (Tabela 20).

Esse decréscimo da concentração de Cu pode ter ocorrido devido ao efeito de diluição, causado pelo fato das concentrações de cobre na parte aérea serem elevadas, próxima ao limite superior de 20 mg kg⁻¹ proposto por Bull (1993) e Martinez et al.,

(1999), o que certamente favoreceu a maior produção de massa seca. Quanto ao acúmulo de cobre, o mesmo proveniente do revestimento de grânulos foi acumulado em maior quantidade (138,5 $\mu\text{g vaso}^{-1}$ de B) em comparação à mistura, com acúmulo de 111,9 $\mu\text{g vaso}^{-1}$ de B (Tabela 20).

TABELA 20. Concentração e acúmulo de cobre (Cu) na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após a semeadura.

| Dose de Cu aplicada no solo | Concentração de Cu | | Média | Cu acumulado | | Média |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|-------|-------------------------|---------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | | Mistura | Revestimento | |
| kg ha ⁻¹ | mg kg ⁻¹ | | | $\mu\text{g vaso}^{-1}$ | | |
| 0,0 | 15,7 | | | 102,5 | | |
| 0,3 | 15,8 ^{ns} | 12,1 ^{ns} | 13,9 | 98,9 ^{ns} | 114,9 ^{ns} | 106,9 |
| 0,6 | 14,0 ^{ns} | 10,4 ^{ns} | 12,2 | 94,6 ^{ns} | 145,9 ^{ns} | 120,3 |
| 1,2 | 15,7 ^{ns} | 11,5 ^{ns} | 13,6 | 113,3 ^{ns} | 117,0 ^{ns} | 115,2 |
| 2,4 | 14,3 ^{ns} | 7,2 [*] | 10,8 | 88,1 ^{ns} | 158,1 ^{ns} | 123,1 |
| 4,8 | 12,6 ^{ns} | 6,3 [*] | 9,5 | 164,3 ^{ns} | 156,3 ^{ns} | 160,3 |
| Média | 14,5 a | 9,5 b | | 111,9 b | 138,5 a | |

Concentração: CV % = 21,8; DMS Fonte = 1,7; DMS Dunnett = 5,5

Acumulado: CV % = 28,8; DMS Fonte = 22,9; DMS Dunnett = 72,4

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância;

* significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

A comparação de doses mostra que para os dois tipos de fertilizantes estudados, o aumento da quantidade de cobre aplicada causa redução da concentração do elemento na planta (Figura 16), no entanto, o acúmulo de cobre aumenta com o aumento da dose aplicada (Figura 17). Novamente, a explicação para esse fato estaria relacionada ao efeito de diluição o qual ocorre devido à maior produção de matéria seca das plantas de milho, proporcionada pelas quantidades elevadas de cobre por elas absorvidas.

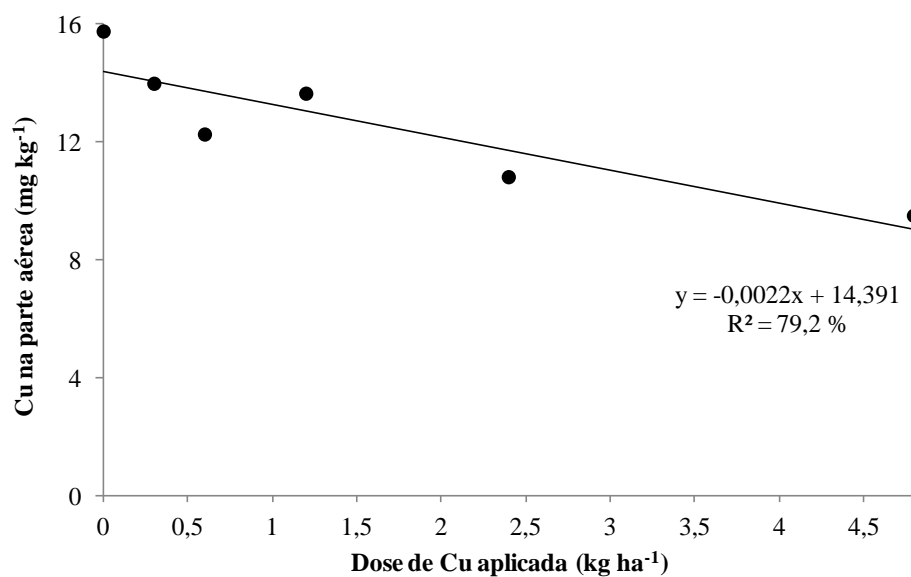


FIGURA 16. Média da concentração de cobre na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura, em função da aplicação no solo de doses crescentes de cobre, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

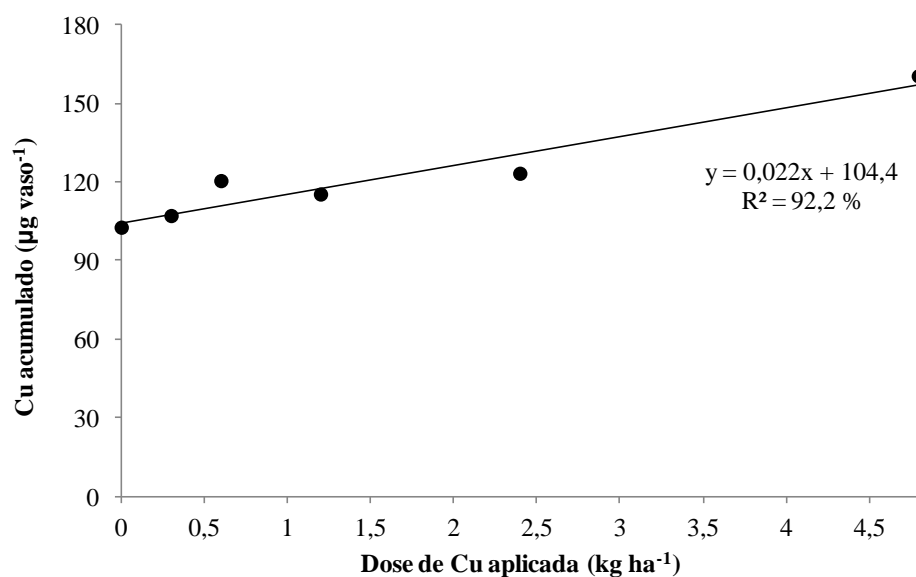


FIGURA 17. Média do cobre acumulado na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura em função da aplicação de doses crescentes de cobre, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

O cobre é elemento importante na fotossíntese atuando no transporte de elétrons e também aumenta a resistência às doenças, principalmente fúngicas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Vitti et al., (2011) descreve os sintomas de deficiência de cobre nas plantas como folhas amareladas, cloróticas e em alguns casos curvadas, difícil aparecimento de folhas novas, pequeno desenvolvimento da planta, enfraquecimento de caules e colmos e murcha mesmo em situações de disponibilidade de água. Tais sintomas não foram observados devido às boas concentrações de Cu nas plantas de milho.

4.2.3.3. Manganês

A concentração de Mn na parte aérea das plantas de milho não sofreu influência das doses aplicadas, o que pode ser explicado pelo fato de, mesmo as plantas que não receberam Mn na adubação terem absorvido quantidades elevadas, ideais ao seu desenvolvimento, pois inicialmente o solo apresentava teor de $9,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mn (Tabela 3), o que, provavelmente não exigiu absorção do elemento proveniente do fertilizante (Tabela 21).

TABELA 21. Concentração e acúmulo de manganês (Mn) na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após a semeadura.

| Dose de Mn aplicada no solo | Concentração de Mn | | Média | Mn acumulado | | Média |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|-------|-----------------------|------------------------|--------|
| | Mistura | Revestimento | | Mistura | Revestimento | |
| kg ha ⁻¹ | mg kg ⁻¹ | | | µg vaso ⁻¹ | | |
| 0,0 | 139,1 | | | 893,5 | | |
| 0,3 | 142,2 ^{ns} | 140,3 ^{ns} | 141,2 | 890,1 ^{ns} a | 1376,5 ^{ns} a | 1133,3 |
| 0,6 | 130,8 ^{ns} | 118,6 ^{ns} | 124,7 | 876,2 ^{ns} b | 1651,5 ^{ns} a | 1263,9 |
| 1,2 | 147,3 ^{ns} | 120,9 ^{ns} | 134,1 | 105,6 ^{ns} a | 1227,3 ^{ns} a | 1139,9 |
| 2,4 | 138,9 ^{ns} | 129,5 ^{ns} | 134,2 | 845,3 ^{ns} b | 2935,8 [*] a | 1890,6 |
| 4,8 | 136,0 ^{ns} | 120,6 ^{ns} | 128,3 | 1900,3 [*] b | 3319,3 [*] a | 2609,8 |
| Média | 139,1 a | 125,9 b | | 1112,9 | 2102,1 | |

Concentração: CV % = 15,0; DMS Fonte = 12,9; DMS Dunnett = 40,8

Acumulado: CV % = 30,9; DMS Fonte = 308,7; DMS Dunnett = 976,2

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Para o manganês acumulado, na forma de mistura, somente houve diferença em relação à testemunha, com incremento de $893,5 \text{ µg vaso}^{-1}$ de Mn para $1900,3 \text{ µg vaso}^{-1}$ de Mn, quando se aplicou a maior dose, o que, com a aplicação na forma de revestimento de grânulos, foi conseguido com dose 50% menor e também se manteve

para a dose de 4,8 kg ha⁻¹ de Mn, atingindo os valores de 2935,8 µg vaso⁻¹ de Mn e 3319,3 µg vaso⁻¹ de Mn, respectivamente (Tabela 21).

O manganês na forma de revestimento de grânulos mesmo tendo sido menos absorvido (menor concentração na parte aérea – 125,9 mg kg⁻¹ de Mn), proporcionou maior acúmulo nas doses de 0,6; 2,4 e 4,8 kg ha⁻¹ de Mn, e na média de Mn acumulado, com valores de 1651,5; 2935,8; 3319,3 e 2102,1 µg vaso⁻¹ de Mn, respectivamente, em comparação aos valores de Mn acumulado proveniente da forma de mistura (876,2; 845,3; 1900,3 e 1112,9 µg vaso⁻¹ de Mn, respectivamente) (Tabela 21).

Tanto para o revestimento de grânulos quanto para a mistura, quanto maior a dose de manganês aplicada no solo, maior acúmulo na parte aérea das plantas, no entanto, pelas equações, pode-se perceber que o incremento na concentração de manganês acumulado para cada unidade de nutriente fornecida é maior (cerca de 2,5 vezes) para o seu fornecimento na forma de revestimento de grânulos de NPK em comparação à sua mistura convencional com esses grânulos (Figura 18).

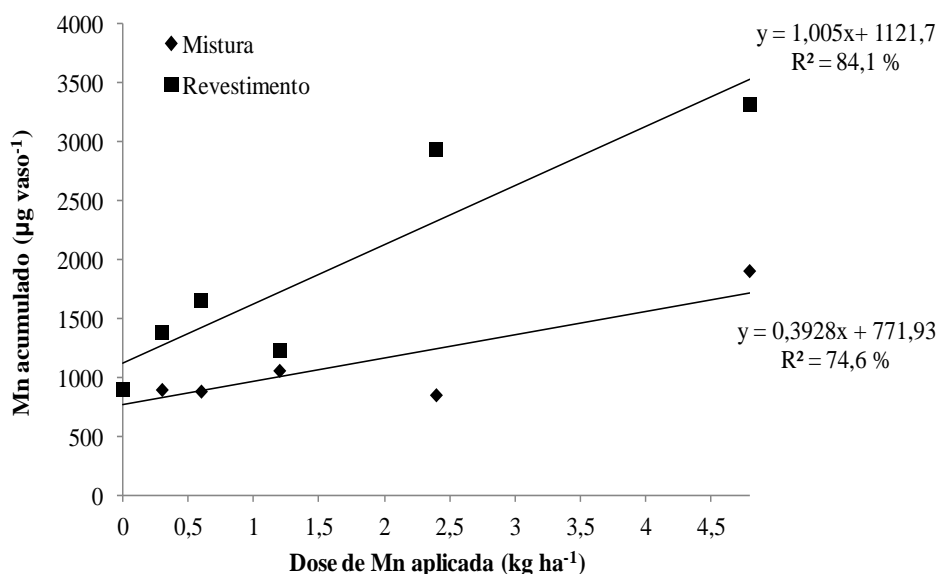


FIGURA 18. Manganês acumulado na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura, em função da aplicação no solo de doses crescentes de manganês, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

Plantas bem nutridas com manganês não apresentam problemas quanto à atividade de algumas enzimas como desidrogenases, descarboxilases, quinases, oxidases

e peroxidases (TAIZ; ZEIGER, 2004), nem quanto ao processo de fotossíntese especificamente na estrutura, funcionamento e multiplicação de cloroplastos e transporte de elétrons, pois são essas suas principais funções na planta.

Além disso, os principais sintomas de deficiência desse micronutriente tais como clorose internerval convergente para a nervura central, estreitamento da lâmina foliar e redução na taxa fotossintética, o que implica em menor desenvolvimento vegetal (TOKESHI, 1991) não foram observados.

4.2.3.4. Zinco

A variação na concentração de Zn na parte aérea das plantas de milho foi de 9,4 mg kg⁻¹ de Zn a 19,2 mg kg⁻¹ de Zn e, dentro dessa, a concentração de Zn na parte aérea das plantas de milho que receberam a aplicação desse micronutriente foi superior à da testemunha sem a referida adubação, exceto para a menor dose do formulado com Zn em mistura de grânulos. Em relação às fontes, observa-se que a absorção do Zn presente no revestimento de grânulos foi maior (17,1 mg kg⁻¹ de Zn) do que a do formulado NPK na forma de mistura (12,8 mg kg⁻¹ de Zn) (Tabela 22).

TABELA 22. Concentração e acúmulo de zinco (Zn) na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após a semeadura.

| Dose de Zn aplicada no solo | Concentração de Zn | | Média | Zn acumulado | | Média |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|-------|-----------------------|-----------------------|-------|
| | Mistura | Revestimento | | Mistura | Revestimento | |
| kg ha ⁻¹ | mg kg ⁻¹ | | | µg vaso ⁻¹ | | |
| 0,0 | | 9,4 | | | 62,3 | |
| 0,4 | 10,5 ^{ns} | 14,6 [*] | 12,5 | 70,1 ^{ns} a | 150,1 ^{ns} a | 110,1 |
| 0,9 | 12,3 [*] | 15,7 [*] | 14,0 | 82,4 ^{ns} b | 223,5 [*] a | 152,9 |
| 1,8 | 13,2 [*] | 17,2 [*] | 15,2 | 94,7 ^{ns} a | 174,8 ^{ns} a | 134,8 |
| 3,6 | 14,9 [*] | 18,8 [*] | 16,9 | 91,7 ^{ns} b | 427,7 [*] a | 259,7 |
| 7,2 | 13,3 [*] | 19,2 [*] | 16,2 | 185,5 ^{ns} b | 525,3 [*] a | 355,4 |
| Média | 12,8 b | 17,1 a | | 104,9 | 300,3 | |

Concentração: CV % = 8,0; DMS Fonte = 0,8; DMS Dunnett = 2,4

Acumulado: CV % = 32,7; DMS Fonte = 40,2; DMS Dunnett = 127,0

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,01 de significância; * significativo e ^{ns} não significativo pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância.

Esse resultado foi oposto ao obtido por Ellis et al., (1965) que mostra que a concentração de Zn no tecido vegetal de ervilha foi superior para fontes de Zn na forma granulada em mistura com grânulos de NPK. No entanto, Tanner e Grant (1973)

afirmam que o ZnO na forma de revestimento de grânulos é a fonte de maior eficiência agrônômica para a cultura do milho.

O formulado que contém o zinco no revestimento dos grânulos de NPK é destaque também pelo fato de somente as plantas com ele adubadas, independente da dose aplicada, terem atingido níveis de absorção entre 15 a 50 mg kg⁻¹ de Zn, ideais ao desenvolvimento de milho (BULL, 1993).

O zinco desempenha papel fundamental na produção de auxinas e é fundamental no processo de ativação de várias enzimas essenciais no metabolismo vegetal (BONOTTO, 2008).

Plantas deficientes em zinco têm crescimento prejudicado e, portanto são menores, raquílicas e com internódios curtos, além de apresentarem cloroses e faixas esbranquiçadas de cada um dos lados da nervura central das folhas, o que é comum em milho e sorgo (Figura 19).

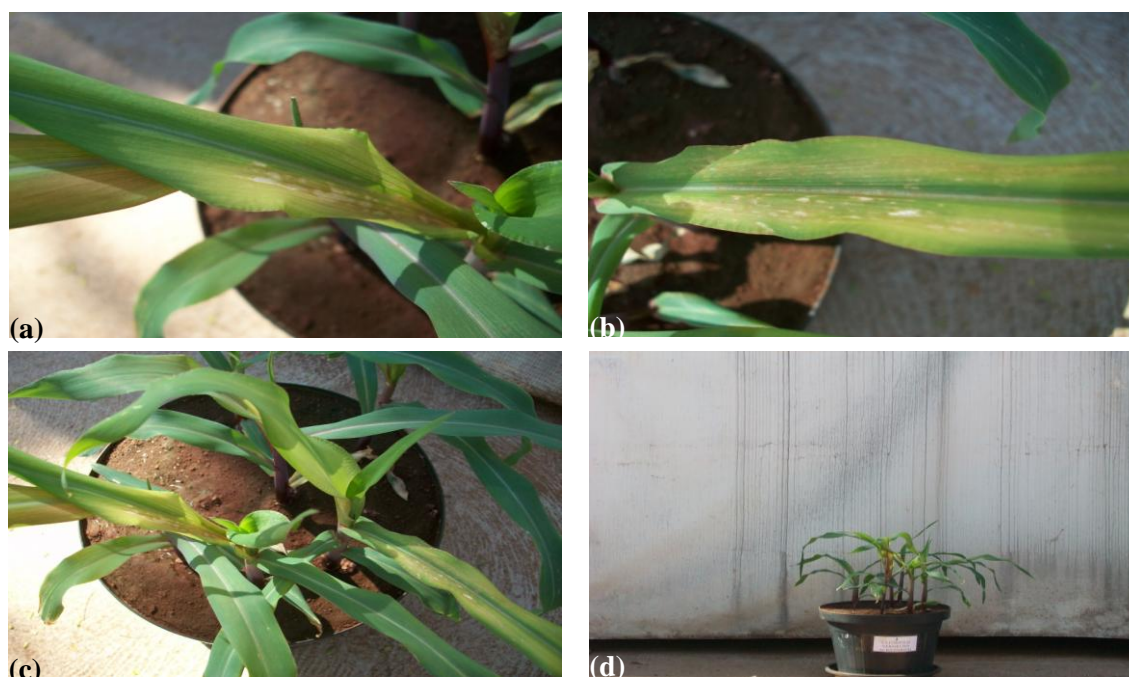


FIGURA 19. Deficiência de zinco em milho aos 29 dias após semeadura em um Latossolo vermelho acriférico típico sem a aplicação de zinco: cloroses, faixas esbranquiçadas e necroses (a), (b) e (c); plantas pequenas (c) e (d).

A figura 19 mostra as deficiências de zinco em plantas de milho cultivadas durante 28 dias em Latossolo Vermelho acriférico típico, em um pré-teste conduzido com cinco tipos de solo, os quais receberam a mesma adubação NPK dos experimentos, sem a aplicação de micronutrientes, e foi realizado com a finalidade de se escolher o

solo a ser utilizado nesse experimento (experimento 2). A escolha foi pelo referido solo, devido à baixa disponibilidade de micronutrientes, principalmente Zn, o que se manifestou nas plantas (Figura 19).

O aumento da dose aplicada causou incremento na concentração de zinco absorvida, porém, a absorção de zinco na forma de revestimento de grânulos é sempre superior à sua absorção na forma de mistura (Figura 20).

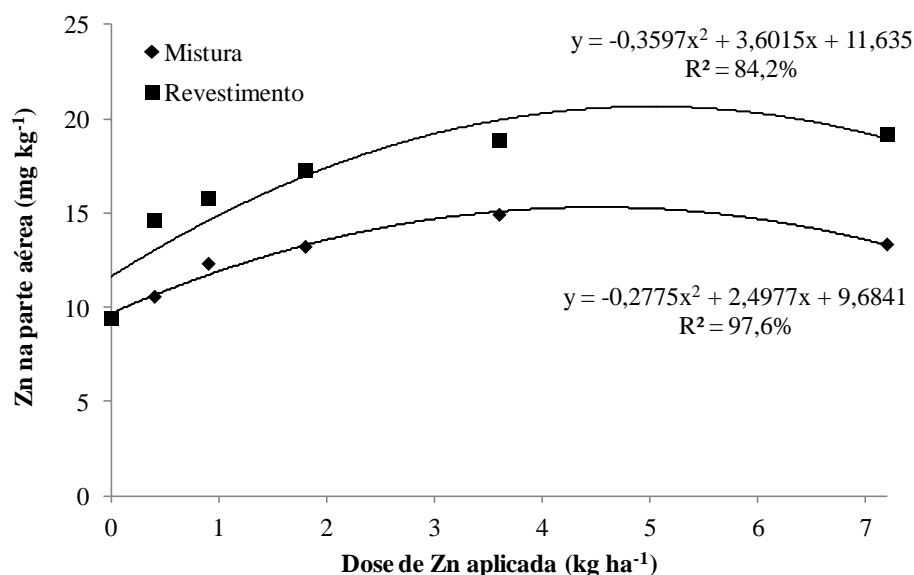


FIGURA 20. Concentração de zinco na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura, em função da aplicação no solo de doses crescentes de zinco, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

Nenhuma das doses de Zn na forma de mistura foi capaz de gerar acúmulo significativamente superior ao da testemunha. Já o fornecimento de zinco na forma de revestimento de grânulos nas doses de 0,9; 3,6 e 7,2 kg ha⁻¹a de Zn causou maior acúmulo desse elemento, com valores de 223,5; 427,7 e 525,3 µg vaso⁻¹ de Zn, respectivamente, em relação à outra fonte (82,4; 91,7 e 185,5 µg vaso⁻¹ de Zn) e à testemunha, com acúmulo de Zn de 62,3 µg vaso⁻¹ (Tabela 22).

Os dois fertilizantes estudados têm comportamento semelhante no que se refere ao acúmulo de zinco sendo esse tão maior quanto maior a dose aplicada. No entanto quando se observa a inclinação das retas e as equações percebe-se que o revestimento de

grânulos com micronutrientes, permite incremento cerca de quatro vezes maior no acúmulo em relação ao zinco em mistura com os grânulos de NPK (Figura 21).

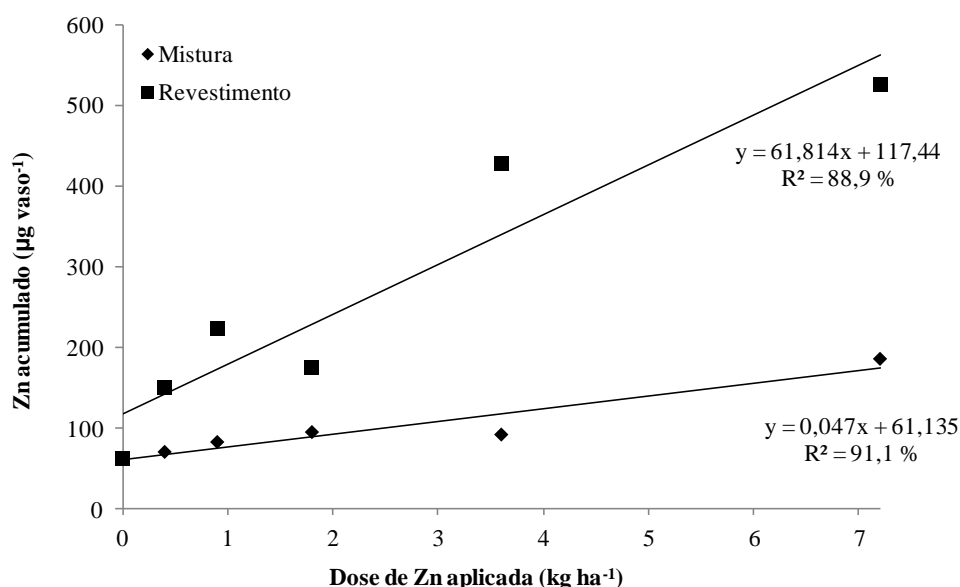


FIGURA 21. Zinco acumulado na parte aérea de plantas de milho colhidas 45 dias após semeadura em função da aplicação de doses crescentes de zinco, obtidas de fertilizantes contendo-o na forma de mistura de grânulos de NPK e no revestimento de grânulos de NPK.

4.2.4. Correlação entre os teores de micronutrientes no solo e o acumulado na parte aérea

Para o boro, devido ao seu teor baixo no solo, as correlações positivas e significativas indicam que independente da sua forma no fertilizante, quanto maior o teor no solo, maior a absorção pela planta (Tabela 23).

Para o cobre, a correlação significativa quando se usa a forma revestida indica que com o aumento dos teores do elemento no solo, a absorção pela planta também aumenta, o que não ocorre para a forma de mistura (Tabela 23).

As correlações não significativas e negativas para o manganês indicam que a boa disponibilidade inicial é suficiente para ser absorvida pela planta e não permite que haja incremento no teor do elemento no solo (Tabela 23).

Para o zinco, não há correlação significativa porque, devido à sua baixa quantidade inicial no solo e sua importância para a cultura do milho, somente as

maiores doses, da fonte revestida, foram eficientes para incrementar o seu teor na parte aérea (Tabela 23).

TABELA 23. Correlação entre os teores de micronutrientes encontrados no Latossolo Vermelho acriférico típico e o acumulado na parte aérea de plantas de milho, aos 45 dias após semeadura.

| Micronutrientes | | Teores no solo (mg dm ⁻³) | | | | | | | |
|--------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| acumulados | | B | | Cu | | Mn | | Zn | |
| (µg vaso ⁻¹) | | Mistura | Revestido | Mistura | Revestido | Mistura | Revestido | Mistura | Revestido |
| B | Mistura | 0,83* | - | - | - | - | - | - | - |
| | Revestido | - | 0,96* | - | - | - | - | - | - |
| Cu | Mistura | - | - | 0,79 | - | - | - | - | - |
| | Revestido | - | - | - | 0,83* | - | - | - | - |
| Mn | Mistura | - | - | - | - | -0,16 | - | - | - |
| | Revestido | - | - | - | - | - | -0,05 | - | - |
| Zn | Mistura | - | - | - | - | - | - | 0,45 | - |
| | Revestido | - | - | - | - | - | - | - | 0,73 |

* Correlação significativa a 0,05.

5. CONCLUSÕES

O revestimento dos grânulos de NPK com micronutrientes é superior à mistura física de micronutrientes granulados com o NPK quando se compara o teor de zinco no solo, e também proporciona incremento nos teores de boro e maior disponibilização de cobre.

A produção de massa seca da parte aérea do milho é maior quando o fertilizante NPK recebe revestimento com micronutrientes. Também o acúmulo de boro, cobre, manganês zinco na parte aérea das plantas de milho é superior quando os grânulos do adubo NPK são revestidos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados permitem que algumas considerações sejam feitas, as quais se relacionam com o tempo de cultivo, as diferenças entre as características dos solos utilizados nos experimentos e à própria interpretação dos resultados dos micronutrientes no solo e na planta.

O cultivo em vasos impõe limitações de espaço, o que interfere no desenvolvimento radicular e consequentemente no crescimento das plantas a partir de determinados estágios de desenvolvimento, o que faz com que o tempo de cultivo seja reduzido e não deva ser estendido até a fase de produção, ou final de ciclo por exemplo. Diante disso, existe a ressalva de que os resultados obtidos são importantes para o período de desenvolvimento inicial das plantas e que, às vezes, em plantas adultas e em épocas de produção, poderia haver alguma alteração.

Quanto às características dos solos, foi observado que o cultivo em solo de textura argilosa e coletado em maior profundidade foi o que apresentou diferenças maiores entre a adubação ou não com micronutrientes e também entre as formas de fornecimento desses elementos. Esses resultados podem ser consequência da menor disponibilidade de micronutrientes no solo devido à adsorção dos mesmos à fração argila e menor quantidade de matéria orgânica, o que reduz principalmente a disponibilidade de boro. No entanto, em solos de textura mais grosseira e em menores superfícies, condições essas do solo utilizado no primeiro experimento, os teores de micronutrientes poderiam permitir resultados mais expressivos também, visto que nesses tipos de solo a disponibilidade de micronutrientes também tende a ser baixa, seja pela origem do solo em si, a qual é de material pobre em micronutriente, por perdas por lixiviação de boro, por exemplo, ou pelo menor teor de matéria orgânica.

Os resultados de cobre no solo mostram que não há disponibilização do elemento proveniente do fertilizante, o que permite inferir que a maior parte das quantidades absorvidas e acumuladas, provavelmente são oriundas dos teores naturais dos solos estudados. Desse modo, surge a necessidade de se estudar novamente os fertilizantes em solos com baixo teor de cobre, com o objetivo de se testar a eficiência das fontes de cobre utilizadas nos formulados.

Por fim, para as análises de zinco no solo também cabe uma consideração quanto a metodologia utilizada, visto que a mesma apresenta certa dificuldade em quantificar os teores de zinco esperados, os quais deveriam apresentar valores maiores e com maior

amplitude, por ser esse o comportamento dos resultados do zinco absorvido e acumulado pelas plantas, que certamente é o zinco proveniente dos fertilizantes aplicados, já que os teores iniciais em ambos os solos utilizados são considerados baixos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F., et al. (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de ciência do solo. 2007. p. 645 – 736.
- ABREU, C. A., et al. **Reação e movimentação de boro no solo, aplicado como ulexita, fritas-termoboro e ácido bórico**. 2004. Relatório. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas. 2004.
- ALCARDE, J. C. Fertilizantes. In: NOVAIS, R. F., et al. (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de ciência do solo. 2007. p. 737 – 768.
- ALLEONI, L. R. F. **Adsorção de boro em podzólico e latossolos paulistas**. 1996. 127 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 1996.
- ALLEN, S. E; Terman, G. L. **Response of maize and sudangrass to zinc in granular micronutrients**. In: International Society of Soil Science. Transactions. Aberdeen. 1966. p. 255-266.
- ALVAREZ, V. H., et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p. 143-167.
- ALVAREZ, V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C; GUIMARÃES, P. T. G; ALVAREZ, V. H. (eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p. 44-57.
- ALVES, V. M. C., et al. Milho. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p. 281-283.
- AMADO, L. O. **Massa seca de milho em função de micronutrientes e calagem**. 2005. 25 f. Relatório (Estágio Supervisionado em Agronomia). Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá. 2005.
- ARAÚJO, I. B., et al. Eficiência nutricional do milho em resposta a fontes e modos de aplicação de fósforo. **Revista Ceres**, Viçosa, v.50, n.287, p.27-39, 2003.
- ASSIS, F. Assistat – Assistência Estatística. Disponível em: <<http://www.assistat.com/indexp.html>>. Acesso em: 15 Fev. 2012.
- BARBOSA FILHO, M. P., et al. Fontes de zinco e modos de aplicação sobre a produção de arroz em solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, p. 1713-1719, 1982.

BARBOSA FILHO, M. P.; DUNIA, J. F.; FAGERIA, N. K. Zinco e ferro na cultura do arroz. Brasília: **EMBRAPA-SPI**, 1994.71p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 49).

BARROW, N. J. Mechanisms of reaction of zinc with soil and soil components. In: ROBSON, A. D. (Ed.). **Zinc in soil and plants.**, 1993. p. 15-31. (Developments in plant and soil sciences, v. 55)

BONOTTO, I. **Tratamento de sementes de milho com formulação suspensão concentrada à base de zinco**. 2008. 41 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2008.

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (ed.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafós, 1993. p. 63-121.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, Crawley, v. 302, p. 1–17. 2008

CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. In: DELL, B.; ROWN, P. H.; BELL, R. W. (ed.). **Boron in soil and plants: review**. Symposium, Chiang Mai, reprinted Plant and Soil, v.193, n.1-2, p.71-83, 1997.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. **Nutrição e adubação do milho**, 2013. Disponível em: <
http://xa.yimg.com/kq/groups/35137484/1237253435/name/nutricao_adubacao_milho.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2013.

COELHO, A. M., et al. **Nutrição e adubação do milho**, 2011. Disponível em: <
http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_7_ed/feraduba.htm>. Acesso em: 17 maio 2012.

COELHO, A. M., et al. **Nutrição e adubação do milho**, 2006. Disponível em: <
http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_2ed/feraduba.htm>. Acesso em: 13 mar.2013.

DECARO, S. T., et al. Efeito de doses e fontes de zinco na cultura do milho. **Revista da Agricultura**, Piracicaba, v.58, p. 25-36, 1983.

DEV, G.; PRASAD, N.; MARWAHA, B. C. Effect of balanced application of N, P, K and deficient zinc and micronutrients in increasing crop yields: IMPHOS experience from on-farm trials. IMPHOS, Ludhiana. 2011

ELLIS, B. G.; DAVIS, J. F.; JUDY, W. H. **Effect of method of incorporation of zinc in fertilizer on zinc uptake and yield of pea beans**. Soil Science Society of America Proceediings, Madison, v.29, p. 635-636. 1965.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 412p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. **Tecnologias de produção de soja:** região central do Brasil, 2001/2002. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 267p. (Documentos, 167)

FARIA, L. C.; GUARDIEIRO, G. A. Micronutrientes para a cultura do milho. **Boletim Técnico do Milho**, Luís Eduardo Magalhães, n. 2, p. 14. 2011.

FAVARIN, J. L.; TEZOTTO, T.; RAGASSI, C. F. **Uso racional de micronutrientes na cultura de milho**. 2008. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2008. 32 p. (Informações agronômicas, Nº 122).

FAVARIN, J. L.; MARINI, J. P. **Importância dos micronutrientes para a produção de grãos**, 2000. Disponível em: < <http://www.snagricultura.org.br/artigos/artitec-micronutrientes.html> >. Acesso em: 12 mar. 2011.

FERREIRA, N. E., et al. (eds.) 2001. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. CNPq/FAPESP. Jaboticabal. 506 p.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Recife, v.6, p.36-41, 2008.

FURTINI NETO, A. E. F., et al. **Estratégias de adubação para a restituição de zinco na sucessão soja – milho em plantio direto no Cerrado**. 2008. 19 f. Projeto de Pesquisa – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2008.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p.185-226.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SIMPOSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1997, Dourados. **Anais...** Dourados: Embrapa-CPAO, 1998. p.76-80. (Embrapa-CPAO. Documentos, 22).

GALRÃO, E. Respostas das culturas aos micronutrientes boro e zinco. In: Borkert, C.M; Lantmann, A.F (eds). **Enxofre e Micronutrientes na Agricultura Brasileira**. XVII Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo. 1988. p. 205-238.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: GOEDERT, W. J. (ed.). **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1986. p.237-259.

GRAHAM, R. D.; HANNAN, R. J.; UREN, N. C. (eds.) **Manganese in Soils and Plants**. Glen Osmond: Waite Agricultural Research Institute. 1988. p. 52-233.

GUPTA, U. C. **Boron and its role in crop production**. Charlottetown, Prince Edward Island: Agriculture Canada Research Station. 1993. p.46.

JUDY, W., et al. **Field and laboratory studies with zinc fertilization of pea beans**. Quartely Bulletin. Michigan State University Agricultural Experiment Station, East Lansing, v. 46, p. 386-400. 1964.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. **Micronutrientes na Fisiologia de Plantas:** Funções, Absorção e Mobilidade. 2007. 3 p. (Encarte Técnico – Informações Agronômicas nº 118).

KORNDÖRFER, G. H.; EIMORI, I. E.; TELLECHEA, M. C. R. Efeito da técnica de adição de zinco a fertilizantes granulados na produção de matéria seca de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, p. 329-332. 1987.

KORNDÖRFER, G. H., et al. Formas de adição de zinco a um formulado NPK e seu efeito sobre a produção de milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, p. 555-560. 1995.

LHER, J. Chemical reaction of micronutrients in fertilizers. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (ed.) **Micronutrients in Agriculture**. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1991. p. 523-548.

LONERAGAN, J. F.; WEBB, M. J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. In: ROBSON, A. D. (Ed.). **Zinc in soil and plants**, Perth: The University of Western Australia, v. 55, 1993. p.119-134.

LOPES, A. S. **Micronutrientes:** Filosofia de Aplicação e Eficiência Agronômica. São Paulo: Associação Nacional para a Difusão de Adubos, 1999. 58 p. (Boletim Técnico nº 8).

LOPES, A. S. **Micronutrientes:** filosofias de aplicação, fontes, eficiência agronômica e preparo de fertilizantes. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS / CNPq, 1991. p.357-390.

LOPES, A. S. Micronutrientes: filosofias de aplicação, fontes, eficiência agronômica e preparo de fertilizantes. In: SIMPÓSIO SOBRE MICRONUTRIENTES NA AGRICULTURA, 1988, Jaboticabal. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p. 351-390.

LOPES, A. S.; ABREU, C. A. Micronutrientes na Agricultura Brasileira: Evolução Histórica e Perspectivas Futuras. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). **Tópicos Especiais em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 265-298. 2000.

MALAVOLTA, E., et al. Eficiência relativa de fontes de Zn para o milho. **Anais da Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”**, Piracicaba, v. 44, p. 57-76, 1987.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas:** princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997, 319 p.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental:** micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos. São Paulo: Produquímica, 1994. 153p.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Recomendações**

para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p. 143-167.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. Potassium in crop production. **Advances in Agronomy.** Nova York, v.33, p. 59-110, 1980.

MONTEIRO FILHO, M. Perigo invisível: resíduos tóxicos em micronutrientes: veneno na produção de alimentos. **Revista Problemas Brasileiros**, São Paulo, n. 371, 5 p. 2005.

MOREIRA, S. G. **Micronutrientes na agricultura:** qual a fonte você está comprando?, 2003. Disponível em:
<<http://rehagro.com.br/plus/modulos/noticias/ler.php?cdnoticia=85>>. Acesso em: 17 abr. 2013.

MORTVEDT, J. J.; GILKES, R. J. Zinc Fertilizers. In: ROBSON, A. D. (ed.) **Zinc in Soils and Plants.** Perth: The University of Western Australia, v. 55, 1993. p. 33-44.

MORTVEDT, J. J. Crop response to level of water-soluble zinc in granular zinc fertilizers. **Fertilizer Research**, Cambridge, v.33, p. 249-255, 1992.

MORTVEDT, J. J. Micronutrient fertilizer technology. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (eds.) **Micronutrients in Agriculture.** 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 523-548.

MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M. Availability to corn of zinc applied with various macronutrients fertilizers. **Soil Science**, Baltimore, v.108, p. 180-187, 1969.

NIKITN, A. A. Production and use of trace salts in fertilizers. In: SAUCHELLI, V. (ed.). **Chemistry and technology of fertilizers.** 4.ed. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1967. p. 435-445.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. (ed.). **Produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: FEALQ/ USP, 1993. p.133-146.

RAIJ, B.V., et al. (eds.). **Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais.** Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba: Potafos, 1991, 343 p.

RAIJ, B. V. Geoquímica de micronutrientes. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds.). **Micronutrientes na agricultura.** Piracicaba: Potafós, 1991b. p. 99 -111.

RENGEL, Z; GRAHAM, R. Importance of seed zinc content for wheat growth on zinc-deficient soil. I. Vegetative growth. **Plant Soil**, Crawley, v.173, p. 259–266. 1995

RESENDE, A.V. **Micronutrientes na agricultura brasileira:** disponibilidade, utilização e perspectivas. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral. 2005. 37 p. (Série Estudos e Documentos).

- RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Function of micronutrients in plants. In: MORTVEDT, J. J., et al. (eds.). **Micronutrients in agriculture**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 297-328.
- SAUCHELLI, V. Minor and secondary elements in mixed fertilizers. In: SAUCHELLI, V. (ed.). **Chemistry and technology of fertilizers**. 4.ed. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1967. p. 435-445.
- SAUCHELLI, V. **Manual of fertilizer manufacture**. 3. ed. Caldwell, New Jersey: Industry Publications, Inc., 1963. 478p.
- SOUZA, E. C. A.; FERREIRA, M. E. Zinco. In FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos / CNPq, 1991. p.219-242.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; SANTARÉM, E. R. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004, 719p.
- TANNER, P. D.; GRANT, P. M. Effectiveness of zincated fertilizers for young maize as influenced by fertilizer pH and method of applying zinc. **Rhodesian Journal of Agricultural Research**, [S. l], v.11, p.69-75. 1973.
- TOKESHI, H. Cana-de-açúcar. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato e CNPq, 1991, p.485-499.
- VALE, F. **Avaliação e caracterização da disponibilidade de boro e zinco contidos em fertilizantes**. 2000. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2000.
- VITTI, G. C.; QUEIROZ, F. E. C.; QUINTINO, T. A. **Micronutrientes na cana-de-açúcar: mitos e realidades**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Anais_Godofredo_Cesar_Vitti_000fizug9hp02wyiv802hvm3j0am3m2k.pdf>. Acesso em: ago, 2011.
- VOLKWEISS, S. J. **Fontes e métodos de aplicação**. In FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS / CNPq, 1991. p.391-412.
- YAMADA, T. **Deficiências de micronutrientes, ocorrência, detecção e correção: o sucesso da experiência brasileira**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n.105, p.1-12, 2004. (Encarte Técnico).
- YOUNG, R. Providing micronutrients in bulk-blend, granular fertilizers. **Commercial Fertilizers**, Atlanta, v.118, n. 1, p.21-24. 1969.