

Câmpus
Ipameri



Universidade
Estadual de Goiás



Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal

**LIXIVIAÇÃO DE BORO EM LATOSSOLO EM FUNÇÃO DE
FONTES E DOSES**

JEFFERSON FERREIRA DA SILVA

MESTRADO

Ipameri-GO

JEFFERSON FERREIRA DA SILVA

**LIXIVIAÇÃO DE BORO EM LATOSSOLO EM FUNÇÃO
DE FONTES E DOSES**

Orientador: Prof. Dr. Ednaldo Cândido Rocha

Dissertação apresentada à
Universidade Estadual de Goiás – UEG,
Câmpus Ipameri como parte das exigências
do Programa de Pós-Graduação em
Produção Vegetal para obtenção do título de
MESTRE.

Ipameri
2019

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FSI586I Ferreira da Silva, Jefferson
LIXIVIAÇÃO DE BORO EM LATOSSOLO EM FUNÇÃO DE FONTES E
DOSES / Jefferson Ferreira da Silva; orientador Ednaldo Cândido
Rocha. -- Ipameri, 2019.
32 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação Mestrado
Acadêmico em Produção Vegetal) -- Câmpus-Ipameri, Universidade
Estadual de Goiás, 2019.

1. Ulexita. 2. ácido bórico. 3. Etalonamina. 4. adubação. I. Cândido
Rocha, Ednaldo, orient. II. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "LIXIVIAÇÃO DE BORO EM LATOSSOLO EM FUNÇÃO DE FONTES E DOSES"

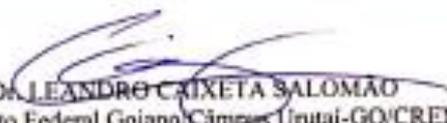
AUTOR(A): Jefferson Ferreira da Silva

ORIENTADOR(A): Ednaldo Cândido Rocha

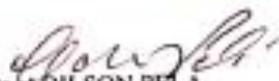
Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE(A) EM PRODUÇÃO VEGETAL, pela comissão Examinadora:



Prof. Dr. EDNALDO CÂNDIDO ROCHA
Universidade Estadual de Goiás/Câmpus Ipameri-GO/PPGPV



Prof. Dr. LEANDRO CAIXETA SALOMÃO
Instituto Federal Goiano/Câmpus Urutai-GO/CRENAC



Prof. Dr. ADILSON PELLA
Universidade Estadual de Goiás/Câmpus Ipameri-GO/PPGPV

Data da realização: 25 de abril de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico ao meu pai Antônio de Fátimo da Silva (*in memoriam*), que nos deixou há pouco tempo, à minha mãe Lucy Maria da Silva por todo apoio, à minha namorada Dayana Araújo por todo amor e companheirismo, meu irmão João Neto, à minha cunhada Laura Caroline e aos meus sobrinhos, Thiago Ferreira e João Luccas Ferreira.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos em minha vida.

À Universidade Estadual de Goiás – Câmpus Ipameri e a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRP) pela oportunidade da formação acadêmica e apoio para realização desta dissertação.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Ednaldo Cândido Rocha pela orientação, empenho, paciência e ajuda na elaboração deste trabalho.

Ao Professor Dr. Adilson Pelá pela grande colaboração durante todo período do desenvolvimento dessa dissertação.

Ao Doutorando Matheus da Silva Araújo, pela imensa contribuição na instalação do experimento.

Ao discente de agronomia Henyo Alves Rodrigues e à discente de Engenharia Florestal Stephany Diolino Cunha, pela contribuição na realização das análises e na condução do experimento.

Aos meus amigos mestrados que sempre me apoiaram e ajudaram, contribuindo para a minha formação.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
INTRODUÇÃO.....	1
OBJETIVOS.....	4
MATERIAL E MÉTODOS.....	5
RESULTADOS	10
DISCUSSÃO	15
CONCLUSÕES	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

RESUMO

A deficiência de boro é a que ocorre em maior frequência entre os micronutrientes, acarretando grandes perdas de produtividade em diversas culturas no Brasil. No entanto, as recomendações de seu uso na adubação não podem ser desordenadas e sem critérios. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de lixiviação do boro em função de doses e fontes, além de determinar a fonte que apresenta menor potencial de lixiviação e avaliar perdas por lixiviação em diferentes doses em diferentes camadas de solo. O experimento foi instalado na área experimental da Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Ipameri. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x5, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelas fontes ácido bórico, ulexita e H₂ Boro e o segundo fator as doses de B (0; 12; 24; 36; e 48 kg ha⁻¹). Na confecção da unidade experimental usaram-se dois anéis de tubo de PVC com 10 cm de altura cada na base e um de 12 cm de altura no topo com 10 cm de diâmetro. Esses anéis foram fixados uns aos outros e preenchidos até uma altura de 30 cm com Latossolo de textura média coletado na camada superficial (0 a 40 cm). Logo após instalou-se um sistema coletor de água percolada da irrigação no fundo de cada coluna de solo e aplicou-se o boro na superfície de cada coluna de solo, com umidade próxima a capacidade máxima de retenção de água. A comparação entre os fatores camadas do solo/líquido lixiviado em cada fonte de boro e fontes do boro em cada dose e em cada camada foi realizada aplicando o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e o teste de medianas. Adicionalmente, para o fator doses de B foi realizada a análise de regressão linear simples e polinomial. Independente da dose aplicada, a fonte ulexita é a que apresentou o menor conteúdo de boro solúvel no perfil dos solos analisados e também do líquido lixiviado. O ácido bórico foi a única fonte que teve comportamento diferente em relação ao conteúdo de boro em diferentes camadas de solo e no material lixiviado. Na camada de 21 a 30 cm de solo a ulexita é a fonte com menor conteúdo de boro solúvel. Os comportamentos das fontes mais solúveis, no caso ácido bórico e H₂ boro, independente da dose são muito semelhantes, sendo altamente lixiviáveis no perfil do Latossolo utilizado.

Palavras-chaves: Ulexita, ácido bórico, Etalonamina, adubação.

ABSTRACT

Boron deficiency is the one that occurs most frequently among micronutrients, causing great losses of productivity in several crops in Brazil. However, the recommendations of their use in fertilization can not be disordered and without criteria. The objective of this work was to evaluate the potential of boron leaching as a function of doses and sources, as well as to determine the source with the lowest leaching potential and to evaluate leach losses at different doses in different soil layers. The experiment was installed in the experimental area of the State University of Goiás, Câmpus Ipameri. The experimental design was completely randomized, in a 3x5 factorial scheme, with four replications. The first factor consisted of boric acid, ulexite and H₂ Boron sources, and the second factor was B (0; 12; 24; 36; and 48 kg ha⁻¹). In the preparation of the experimental unit two PVC pipe rings 10 cm high each at the base and one 12 cm high at the top with 10 cm diameter were used. These rings were fixed to each other and filled to a height of 30 cm with a Latosol of medium texture collected in the superficial layer (0 to 40 cm). Soon after, a percolated irrigation water collection system was installed in the bottom of each soil column and the boron was applied to the surface of each soil column, with humidity close to the maximum water retention capacity. The comparison between the soil / leachate layer factors in each boron source and boron sources at each dose and at each layer was performed by applying the Kruskal-Wallis non-parametric test and the median test. In addition, for the dose factor of B, linear and polynomial regression analysis was performed. Regardless of the applied dose, the source ulexite is the one that presented the lowest content of soluble boron in the profile of the analyzed soils and also of leached liquid. Boric acid was the only source that had different behavior in relation to the content of boron in different layers of soil and leached material. In the 21 to 30 cm soil layer the ulexite is the source with the lowest content of leached boron. The behavior of the most soluble sources, in the case boric acid and H₂ boron, regardless of the dose are very similar, being highly leachable in the profile of the Latosol used.

Key words: Ulexite, boric acid, etalonamine, fertilizing.

INTRODUÇÃO

Entender e conhecer a dinâmica do boro (B) no solo é importante tanto para a correção de uma eventual deficiência do micronutriente quanto para a prevenção dos casos de toxicidade, haja vista que a lixiviação e a adsorção deste elemento são importantes componentes para definição de uma adubação equilibrada, no tempo correto e utilizando a melhor fonte.

A agricultura brasileira no Centro-Oeste possui grande importância para o agronegócio, ocupando cerca de 20% do território brasileiro, esta região é apontada como uma das últimas fronteiras agrícolas mundiais, apresentando características de clima e solo favoráveis ao cultivo de diversas culturas. No entanto, ainda assim são encontrados solos ácidos, pobres em bases, baixos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, com baixo suprimento de nitrogênio, fósforo, enxofre e boro (CAPONE, 2016).

As quantidades de adubos aplicados dependerão das necessidades nutricionais da espécie utilizada, da fertilidade do solo, da forma de reação dos adubos com o solo, da eficiência dos adubos, de fatores de ordem econômica e da disponibilidade hídrica local (RYAN et al., 2010). Com isso, a adubação torna-se essencial para o sucesso da produção e o uso de micronutrientes vem ganhando destaque entre os produtores, principalmente pelo fato de reduzir os custos da produção (ARTUR et al., 2014; DOURADO NETO et al., 2012).

Os micronutrientes são requeridos em baixas quantidades, porém são de extrema importância para garantir o desenvolvimento das plantas, pois estão presentes nas principais funções metabólicas das células e a deficiência pode ter ligação com grandes perdas na produtividade (CORCIOLI et al., 2016).

O único micronutriente presente como molécula neutra na solução do solo é o boro (B), que se encontra na forma de ácido bórico não dissociado, H_3BO_3 (só em pH menor que 7), o qual é transportado no solo até o sistema radicular via fluxo de massa (MATTIELLO et al., 2009). Entretanto, quando o elemento é incorporado aos tecidos da planta, o mesmo é considerado imobilizado, não atendendo deficiências de outros tecidos (LEITE et al., 2011).

O boro disponibilizado no solo é proveniente da decomposição de matéria orgânica e também da liberação de minerais de argila (GOLDBERG e GLAUBIG, 1985). A absorção é dependente da concentração na solução do solo e também das reações de adsorção entre o micronutriente e os adsorventes existentes no solo, tais como os óxidos de ferro e alumínio, os minerais de argila, a matéria orgânica, o hidróxido de magnésio e o carbonato de cálcio, que estão diretamente ligados ao material de origem, textura do solo, pH, calagem e lixiviação responsáveis por variáveis influenciando a dinâmica do boro, considerando que o material de origem e a textura do solo são apontados como elementos essenciais (LEITE et al., 2011).

Grande parte do B que é aplicado ao solo como fertilizante permanece solúvel e pode ser lixiviado no perfil do solo (SILVA et al., 1995), mas também há uma parcela do micronutriente que não está inicialmente em solução, onde esta parcela pode ser dissolvida posteriormente e, conseqüentemente, lixiviada no perfil do solo (COMMUNAR e KEREN, 2007).

A deficiência de boro é muito comum, principalmente em solos arenosos e pobres em matéria orgânica (MUSSKOPF e BIER, 2010; ZANÃO JÚNIOR et al., 2010), pois o mesmo pode ser lixiviado para camadas mais profundas do solo, onde o sistema radicular das plantas não atinge ou devido a períodos de pouca umidade e em condições de solo com aplicação exagerada de calcário que dificultam a absorção de nutrientes pelas plantas (MESQUITA et al., 2011), resultando no baixo fornecimento de B e diminuindo não só as produtividades, como a qualidade do produto colhido (BRITO NETO et al., 2011).

Grande parte do boro disponível no solo está presa à fração orgânica, sendo assim está retido com grande força. Com o decorrer da decomposição da matéria orgânica o boro vai sendo liberado, onde parte é absorvida pelas plantas, parte é perdida por lixiviação e uma fração do boro é retida pelas argilas, sendo que são menores em regiões úmidas nos solos de textura fina, em relação a solos de textura mais grosseira (ROSOLEM e BÍSCARO, 2007).

Solos de textura arenosa com subsolos de textura fina geralmente não respondem tanto a adubação de boro como os arenosos com subsolo de textura mais grosseira. Experimentos de lixiviação indicam que o boro adicionado ao solo permanece na solução e pode se carreado para o horizonte abaixo (TISDALE e NELSON, 1966).

O desempenho da adubação boratada está relacionado diretamente com a rápida lixiviação para camadas mais profundas do solo (OLIVEIRA NETO et al., 2009; COMMUNAR e KEREN, 2007; FAVARETTO et al., 2007; SALTALI et al., 2005), principalmente em função da alta mobilidade desse nutriente na solução do solo. Além disso, a alta disponibilidade do boro aplicado, aliada à estreita faixa entre deficiência e toxidez na planta, pode com facilidade acarretar toxidez (COMMUNAR e KEREN, 2007; LIMA et al., 2007).

Outro importante fator para se levar em consideração é a escolha da fonte de B mais adequada para aplicação no solo, pois a maioria dos adubos boratados apresentam alta solubilidade e, conseqüentemente, maior mobilidade no solo e maior grau de lixiviação, principalmente em solos com texturas arenosas, o que, segundo Mortvedt (1994), tem provocado aumento no uso de fontes de solubilidade lenta, tais como os boratos de cálcio e sódio (ulexita e colemanita) e também fertilizantes líquidos complexados com etalonamina.

As plantas utilizam o boro para inúmeros processos durante o seu desenvolvimento, principalmente: no crescimento; na divisão celular e metabolismo do ácido nucleico; na germinação de grãos de pólen e no crescimento do tubo polínico; na síntese de aminoácidos e proteínas; e no transporte interno de açúcares amidos, nitrogênio e fósforo. No entanto, esse micronutriente apresenta baixíssima mobilidade dentro do floema, onde possui formas complexas de baixa solubilidade, o que torna difícil a redistribuição das folhas mais maduras para os pontos de maior exigência, como os tecidos meristemáticos, sendo assim, é de grande importância a constante disponibilidade ou suprimento do B durante a fase vegetativa das plantas (MASCARENHAS et al., 2014).

A função do B no processo fotossintético não é conhecida, mas sua insuficiência pode afetar o funcionamento das membranas do cloroplasto, influenciando o transporte de elétrons nos tilacóides, tendo como resultado a fotoinibição (LEITE et al., 2010). Adicionalmente, possui função decisiva na formação de novos tecidos, desenvolvimento radicular e também na produtividade, além de possuir relativa mobilidade floemática em algumas espécies (HODECKER et al., 2014).

Já no processo reprodutivo, imputa-se ao B papel ativo na síntese de proteínas, translocação de carboidratos, crescimento do tubo polínico e retenção de sementes (MIWA e FUJIWARA, 2010). No entanto, as recomendações de seu uso na adubação não podem ser desordenadas e sem critérios, sendo que o diagnóstico e a adubação criteriosa essencial para o aumento da produção agrícola (LONERAGAN, 1997).

Para Trautmann et al. (2014), a aplicação de doses crescentes de boro até 2 mg dm^{-3} em Latossolo Vermelho Eutroférico com textura arenosa interferiu de forma negativa no desenvolvimento das raízes e foi indiferente ao desenvolvimento da parte aérea das plantas de soja. Na Tailândia, Lordkaew et al. (2013), ao avaliarem os efeitos do B utilizando vasos com soluções completas de nutrientes, em três variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) e em duas estações de plantio, encontraram correlação alta e positiva entre o peso de grãos (g planta^{-1}) com o vingamento de grãos (%) e com o número de espiguetas por planta.

Portanto, diante dessas controvérsias na literatura sobre a dinâmica do boro em diferentes tipos de solo, principalmente relacionando a doses e fontes, para que se possam obter resultados que melhor expliquem a complexidade do boro, novos estudos são necessários para tentar esclarecer a dinâmica do boro nos solos do Cerrado em função de doses e das fontes utilizadas – ácido bórico, ulexita e H2 Boro (H2 Agrosiences – Borato de monoetanolamina).

OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de lixiviação do boro em um Latossolo Vermelho-Amarelo em função de doses e fontes, além de determinar a fonte que apresenta menor potencial de lixiviação e avaliar perdas por lixiviação em diferentes doses em cada camada de solo avaliada.

MATERIAL E MÉTODOS

Condução do experimento

O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação na área experimental da Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Ipameri (17°43'20" de latitude S e 48°09'44" de longitude O; e altitude de 764m). O município de Ipameri está localizado na região sudeste do estado de Goiás, onde o clima é classificado como Aw (tropical estacional) com precipitação pluvial média anual de 1.600 mm, sendo caracterizado por duas estações bem definidas, uma seca no inverno, no período entre maio e setembro; e uma chuvosa no verão, no período entre outubro e abril, com temperatura média de 23°C (ALVARES et al., 2013). As características da casa de vegetação utilizada são: 3,5 m de pé direito; 30,0 m comprimento; 7,0 m de largura; fechada nas laterais com sombrite 50% na cor preta; e cobertura com plástico transparente 150 micras.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial 3x5 com quatro repetições, onde o primeiro fator foi constituído pelas fontes ácido bórico, ulexita e H₂ Boro (H₂ Agrosociências – Borato de monoetanolamina), e o segundo fator as doses de B (0; 12; 24; 36; e 48 kg ha⁻¹).

A unidade experimental foi composta por um tubo de PVC de 10 cm de diâmetro por 33 cm de altura. Na sua confecção usaram-se dois anéis de tubo de PVC com 10 cm de altura cada na base e um de 13 cm de altura no topo. Esses anéis foram fixados uns aos outros com fita adesiva e preenchidos até a altura de 30 cm com Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média coletado na camada superficial (0 a 40 cm), cuja análise química está apresentada na Tabela 1. Logo após instalou-se um sistema coletor de água percolada da irrigação no fundo de cada coluna de solo e aplicou-se o boro na superfície de cada coluna de solo, com umidade próxima a capacidade máxima de retenção de água (Figuras 1 e 2), que foi definida levando uma amostra do solo coletado à estufa com temperatura de 110 °C até atingir peso constante, onde posteriormente o mesmo foi encharcado até a saturação e após cessar o escoamento da água foi realizada a pesagem e calculada a diferença de peso, sendo assim definida a capacidade máxima de retenção de água.

Tabela 1. Características químicas do Latossolo Vermelho-Amarelo, antes da instalação do experimento.

pH	P (Mehlich-1)	M.O.	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	CTC	V
CaCl ₂	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----					%

5,4	0,8	7,0	0,04	0,2	0,1	1,8	2,14	16,09
B		Cu		Fe		Mn		Zn
-----mg dm ⁻³ -----								
0,28		0,3		34		10,1		0,3

Extratores: P, Na e K - Mehlich-1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ - KCl 1 mol/L; H+Al - Acetado de cálcio 0,5 mol/L a pH 7,0.

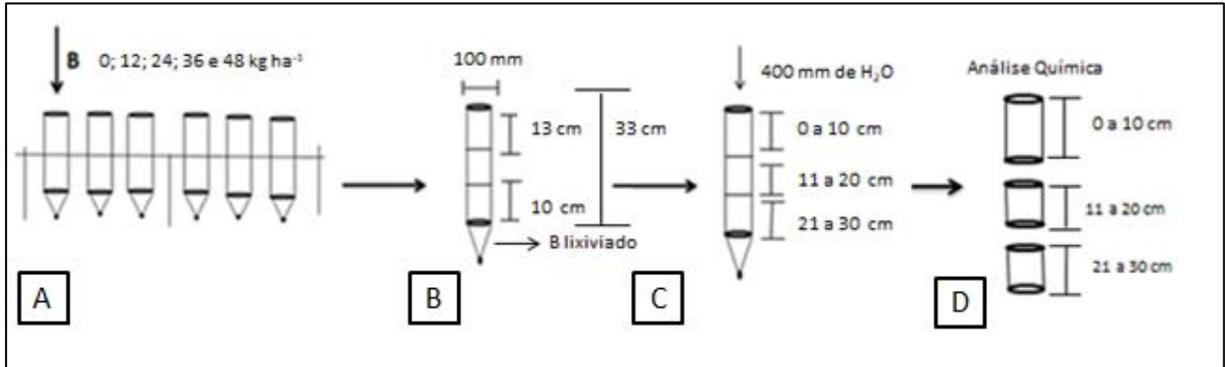


Figura 1. Esquema representando as etapas de condução do experimento: aplicação das doses (A), tamanho do tubo de PVC (B), quantidade de água total aplicada e as diferentes camadas (C) e separação para análise química (D).



Figura 2. Arranjo do experimento após aplicação dos tratamentos, o qual foi conduzido em Ipameri – GO no ano de 2019.

O solo dos tubos de PVC foi irrigado semanalmente com uma lâmina de água de 20 mm até totalizar 400 mm de água acumulados, ou seja, volume que é acumulado após o início da safra de verão na região de Ipameri-GO, correspondendo a aproximadamente a precipitação que ocorre em 20 semanas nesse período. A solução do solo percolada nas unidades experimentais foi coletada ao longo de todo o experimento e submetida à análise química para a determinação da quantidade de B lixiviado durante todo o período.

Após a finalização de todas as irrigações, as amostras de solo de cada camada (0 a 10 cm, 11 a 20 cm e 21 a 30 cm) foram retiradas dos tubos (Figura 3) e foram submetidas à análise química, onde se determinou as quantidades de B em cada camada do solo, mostrando a mobilidade do micronutriente no perfil do solo em função das diferentes fontes e doses.



Figura 3. Processo de retirada das amostras de solo dos tubos para realização da análise química e quantificação de boro lixiviado, em experimento conduzido em Ipameri – GO no ano de 2019.

Análises laboratoriais

As amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório de Solos da Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Ipameri, onde foram realizadas as análises dos teores de B por meio da solução de cloreto de bário (SILVA, 2009). Primeiramente, os sacos plásticos foram prensados com auxílio de uma seladora para haver padronização do tamanho do material onde foram identificados e colocados 10 cm³ do solo para análise, com 0,5 cm³ de carvão ativado e 20 ml de cloreto de bário. Logo após realizou-se um furo com um clipe e os saquinhos foram pendurados com auxílio de uma fita adesiva em uma vasilha com espaços devidamente pré-determinados e levados ao microondas em potência máxima (750 W) por 4 minutos e em potência média (490 W) por 5 minutos e, posteriormente, foi necessário esperar um intervalo de 30 minutos para o material ficar em temperatura ambiente (Figura 4).



Figura 4. Disposição das amostras de solo nos saquinhos de plástico (A), saquinhos com Latossolo Vermelho-Amarelo e carvão ativado (B) e vasilha utilizada no forno micro-ondas com os respectivos tratamentos, cujo experimento foi conduzido em Ipameri – GO no ano de 2019.

Após o resfriamento das amostras, o material foi filtrado imediatamente em papel de filtro e em seguida foi identificado e transferido 4 ml da solução percolada do solo para tubos de ensaio, adicionando 1 ml de solução tampão e 1 ml de azometina-H, deixando essa solução em repouso por 30 minutos em um ambiente sem incidência de luz. Posteriormente, determinou-se as quantidades de B em cada camada do solo, mostrando a mobilidade do micronutriente no perfil do solo em função das diferentes fontes e doses (Figura 5).



Figura 5: Filtragem do material (A), ambiente que o material foi deixado em repouso (B) e realização das análises (C), cujo experimento foi conduzido em Ipameri – GO no ano de 2019.

Para a realização da análise de boro no material lixiviado a metodologia seguiu-se com os mesmos procedimentos utilizados na análise do solo, mas sem a necessidade de submeter o

material ao microondas, uma vez que a solução não necessitava extração do boro do material coletado (Figura 6).

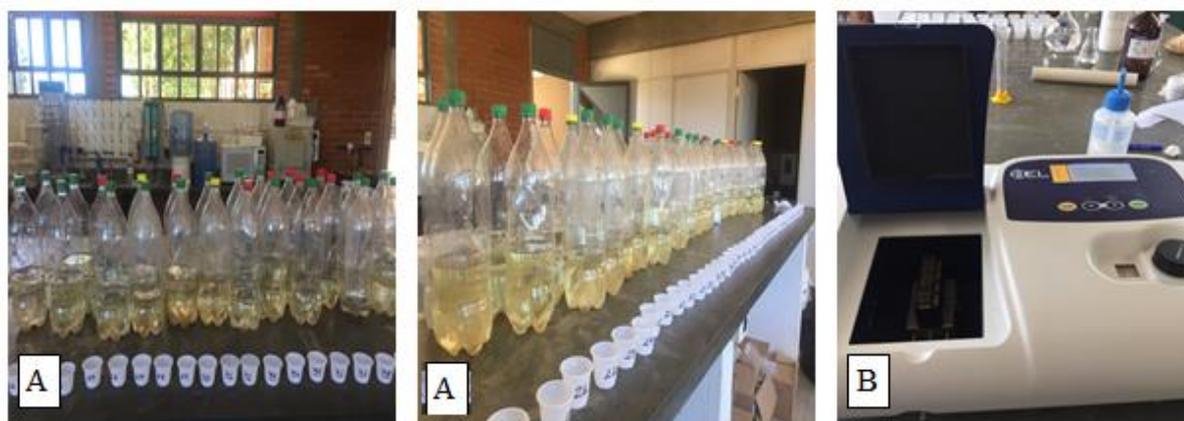


Figura 6. Processo de retirada das amostras do material lixiviado (A) das unidades experimentais para quantificação de boro lixiviado no espectrofotômetro (B), em experimento conduzido em Ipameri – GO no ano de 2019.

Análises estatísticas dos dados

As análises estatísticas foram realizadas utilizando os dados de conteúdo de boro (em mg) obtidos para as três camadas do solo e para o líquido lixiviado. Inicialmente, foi testada a normalidade dos resíduos dos dados e a homogeneidade de variâncias e, em caso de não atendimento destes pressupostos metodológicos [fato que ocorreu principalmente na comparação entre fontes de boros em cada dose (Figura 8)], optou-se pelo uso de técnicas estatísticas não paramétricas. Neste sentido, para a comparação entre os fatores camadas do solo/líquido lixiviado em cada fonte de boro e fontes do boro em cada dose e em cada camada foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e foram realizadas comparações múltiplas dos tratamentos pelo teste de medianas. Adicionalmente, para o fator doses de B foi realizada a análise de regressão linear simples e polinomial.

As análises estatísticas foram conduzidas no software R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018), utilizando o pacote agricolae (MENDIBURU, 2017) para os cálculos estatísticos e o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016) para a representação gráfica dos resultados.

RESULTADOS

Foi observada diferença significativa ($H = 12,43$; $p = 0,006$) para o conteúdo de boro solúvel nas camadas de solo e no líquido lixiviado dentro da fonte ácido bórico, sendo que o conteúdo de boro retido na camada de 0 a 10 cm do solo foi a maior que o conteúdo de boro lixiviado (Figura 7). Por outro lado, para as fontes H2 boro e ulexita, não houve diferença significativa entre as camadas do solo analisadas e o líquido lixiviado ($P > 0,05$).

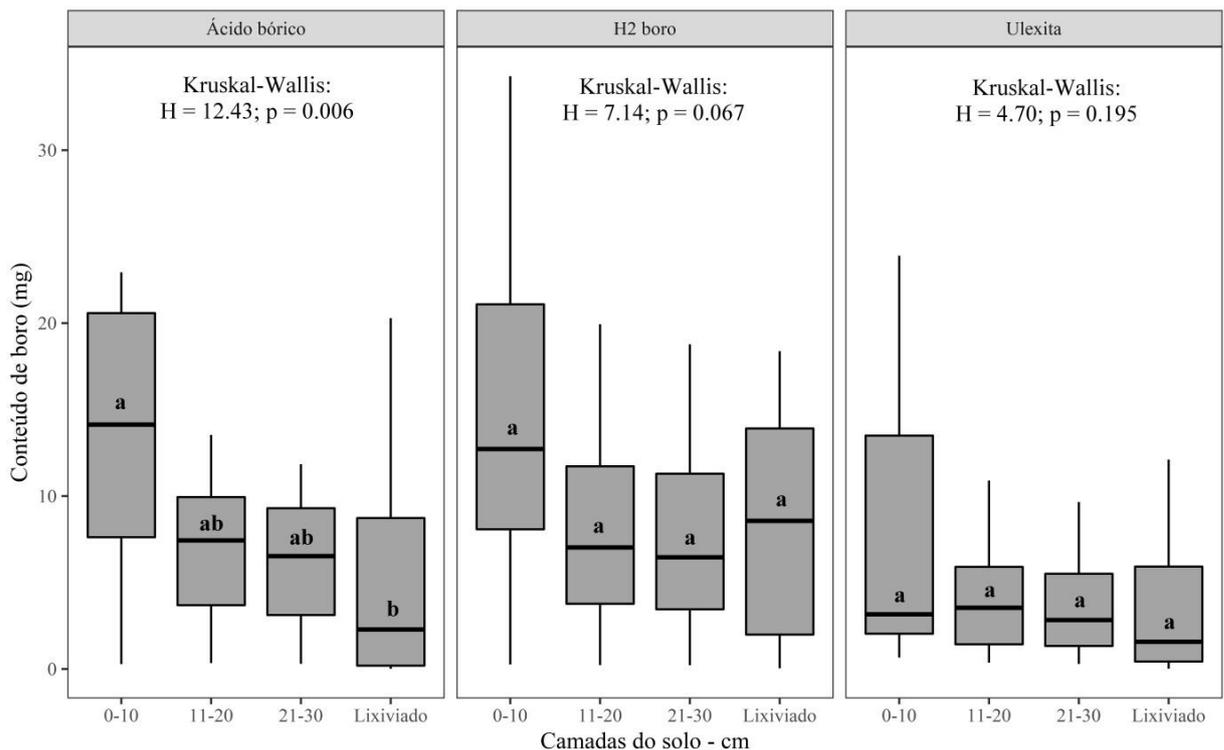


Figura 7: Box-Plot apresentando o resultado da análise de Kruskal-Wallis e do teste de medianas para comparar os segmentos estudados (camadas de solo e líquido lixiviado) em cada fonte de boro. Para cada fonte utilizada, medianas de conteúdo de boro seguidas da mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$).

Independente da dose de boro aplicada (12, 24, 36 e 48 kg de B ha⁻¹), quando se avalia os dados sem separá-los por segmentos (camadas do solo e líquido lixiviado), a fonte ulexita apresentou o menor conteúdo de boro solúvel quando comparada às demais fontes ($p < 0,05$), sendo que as fontes ácido bórico e H2 boro se mostraram semelhantes ($p > 0,05$) em todas as doses testadas (Figura 8).

A fonte ulexita exibiu o menor teor de boro solúvel presente na camada mais profunda do solo (de 21 a 30 cm). No entanto, nos demais segmentos estudados (camadas de 0 a 10 cm

e de 11 a 20 cm do solo e no líquido lixiviado) as três fontes apresentaram conteúdo de boro estatisticamente semelhante ($p > 0,05$) (Figura 9).

Houve ajuste linear crescente no conteúdo de boro solúvel presente em todos os segmentos avaliados (camadas do solo e líquido lixiviado) de acordo com o aumento das doses de boro aplicadas. A fonte H2 boro apresentou os maiores valores de conteúdos de boro em todas as três camadas de solo e no líquido lixiviado até a dose 36 kg ha^{-1} , seguida pelas fontes ácido bórico e ulexita (Figura 10).

Levando em consideração a maior dose de boro utilizada (48 kg ha^{-1}): na camada de 0 a 10 cm de solo, a ulexita apresentou conteúdo de boro 23,6% menor que o H2 boro e 5,6% menor que o Ácido bórico; na camada de 11 a 20 cm de solo, o conteúdo de boro da fonte ulexita foi 49,2% menor que o conteúdo de boro da fonte H2 boro e 28,8% menor que o ácido bórico; na camada de 21 a 30 cm de solo, a ulexita apresentou conteúdo de boro 55,1% menor que a fonte H2 boro e 25,4% menor que o ácido bórico; e no líquido lixiviado, a fonte ulexita evidenciou conteúdo de boro lixiviado 51,8% menor que a fonte H2 boro e 55,4% menor que o ácido bórico (Figura 10).

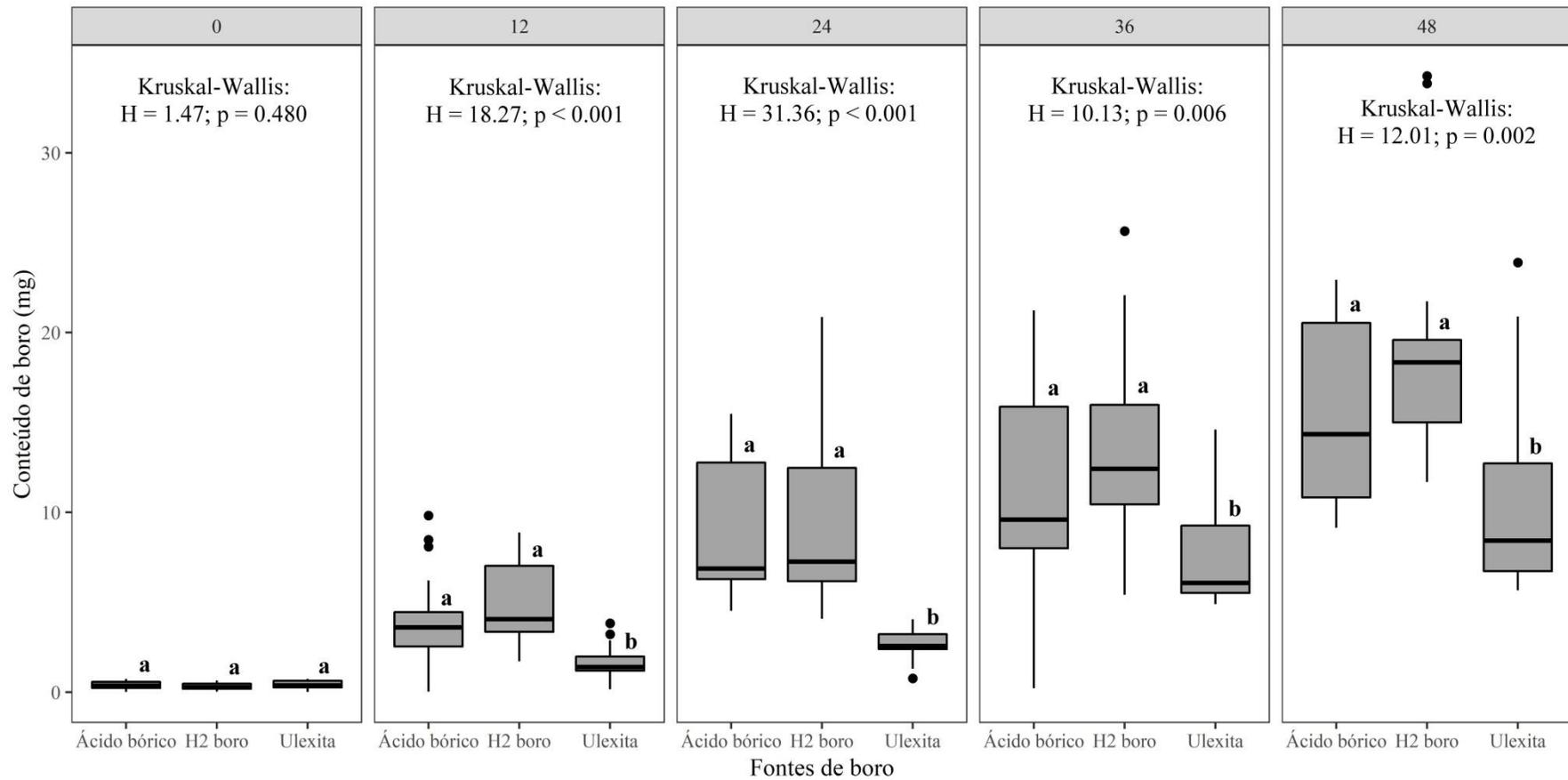


Figura 8: Box-Plot apresentando o resultado da análise de Kruskal-Wallis e do teste de medianas para comparar fontes de boro em cada dose de boro aplicada (0, 12, 24, 36 e 48 kg ha⁻¹). Para cada dose utilizada, medianas de conteúdo de boro seguidas da mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$).

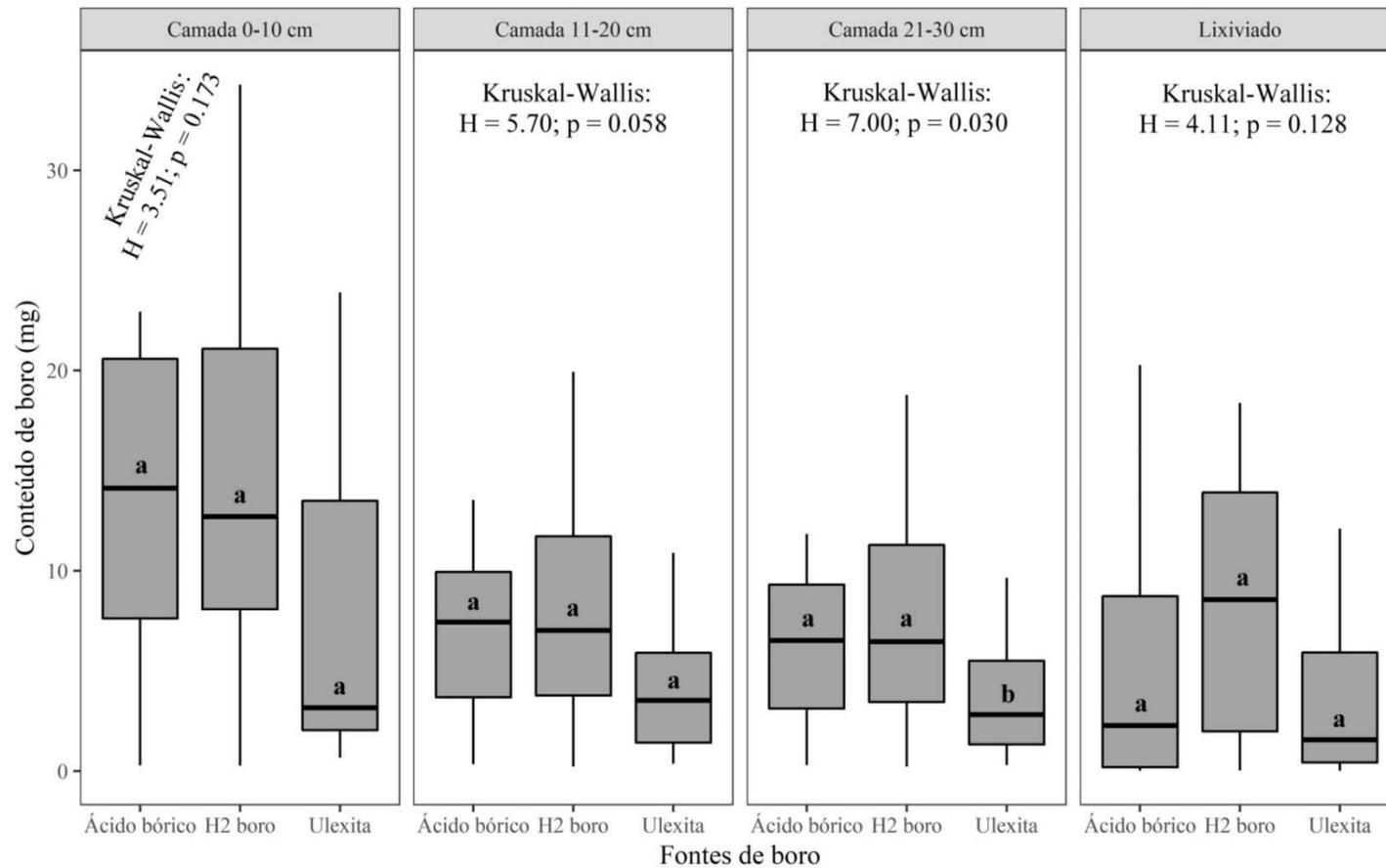


Figura 9: Box-Plot apresentando o resultado da análise de Kruskal-Wallis e do teste de medianas para comparar as fontes de boro em cada segmento avaliado (camadas do solo e líquido lixiviado). Para cada segmento estudado, medianas de conteúdo de boro seguidas da mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$).

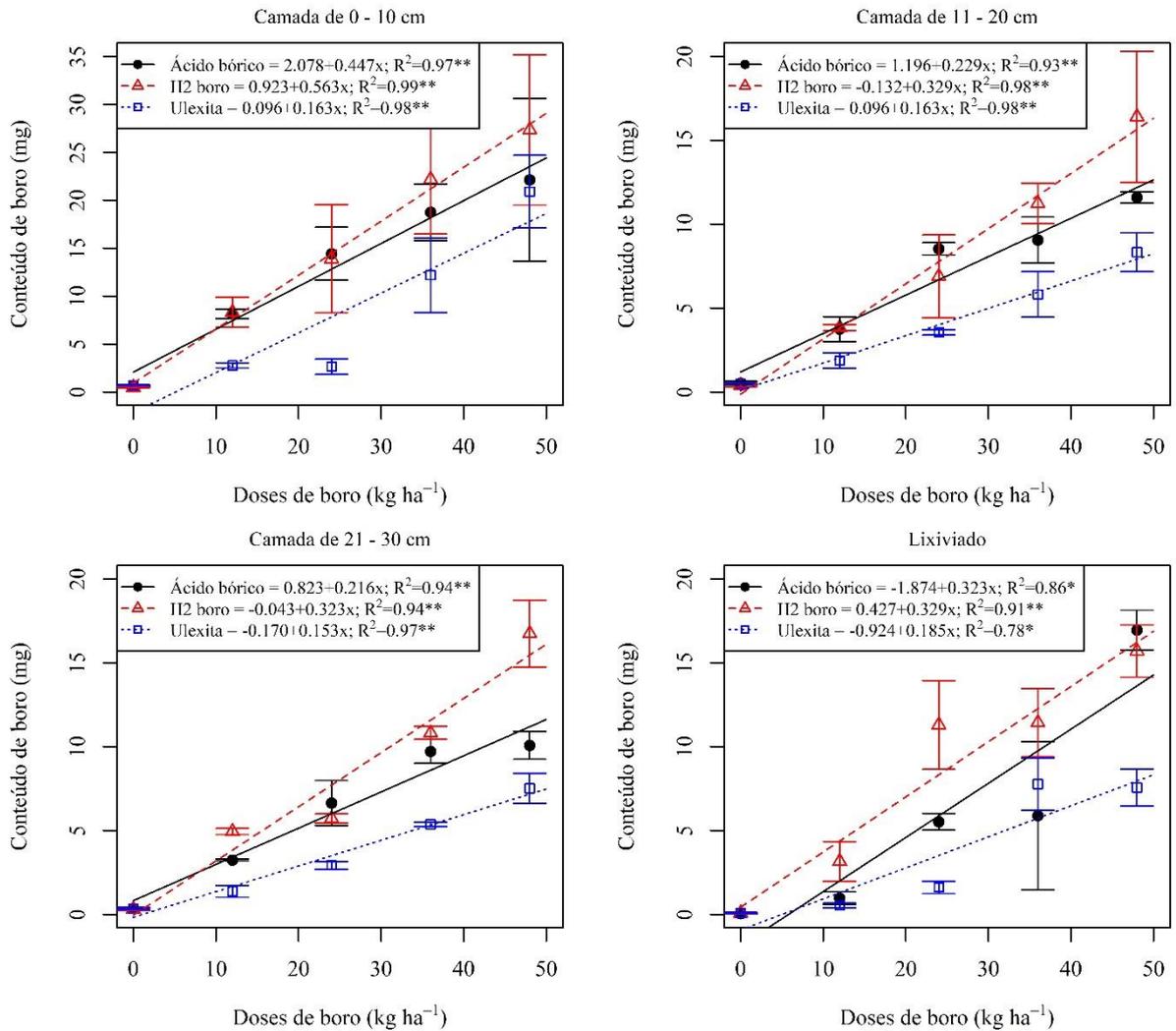


Figura 10. Resultado da análise de regressão para as doses de boro em função das fontes de boro, nas camadas de solo de 0 a 10 cm, 11 a 20 cm, 21 a 30 cm e no líquido lixiviado. UEG, Ipameri-GO, 2019. As barras verticais indicam os erros padrão das médias. * e ** = significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

DISCUSSÃO

A fonte ácido bórico mostrou diferença significativa em relação às camadas de solo apenas entre a camada 0 a 10 cm do solo e o líquido lixiviado, pois o conteúdo de B na primeira camada de solo é cerca de seis vezes maior que a quantidade presente no material lixiviado. Este resultado corrobora com Abreu et al. (2015), que avaliando a lixiviação de B em função de fontes e doses constataram que a concentração de B nas três primeiras camadas, analisadas independentemente do tipo de solo, foi maior no ácido bórico que liberou prontamente o B em comparação às demais fontes.

A ulexita, em todas as doses testadas, foi a fonte que apresentou o menor conteúdo de boro nas camadas de solo, por ser pouco solúvel no solo, resultado explicado por Trautmann (2014), no qual verificou que as fontes de B diferem na dose de 1 mg dm^{-3} com a aplicação de colemanita, fonte menos solúvel e menos lixiviável, onde ocorreram maiores valores de massa e volume radicular na cultura da soja.

Na camada de 21 a 30 cm de solo, a ulexita se diferenciou estatisticamente das demais fontes devido ao conteúdo de boro analisado ser muito menor que as demais fontes (ácido bórico e H₂ boro) independente da camada testada, resultados explicados por Byers et al. (2001) que afirmam que o ácido bórico é a fonte boratada de maior solubilidade em água e de baixa reatividade no solo, possuindo uma elevada disponibilidade inicial e maior suscetibilidade à lixiviação. Em contrapartida, a colemanita apresenta baixa solubilidade, como a ulexita, e lenta liberação, estando menos sujeita a lixiviação (MURPHY e WALSH, 1972), resultado também verificado por Abreu et al. (2015) em que o tratamento controle apresentou o menor teor de B no solo e não diferiu estatisticamente da ulexita, fonte menos solúvel.

Com o aumento das doses aplicadas (12, 24, 36 e 48 kg ha⁻¹) o conteúdo de boro nas diferentes camadas do solo e no líquido lixiviado apresentou crescimento linear, independente da fonte, isto é explicado por Azevedo (2001), que afirma que a adsorção de B ocorre até determinado ponto crítico, a partir do qual a adsorção é baixa e a adubação de B, a partir deste patamar, somente terá como consequência maior perda do nutriente por lixiviação. Esses resultados podem explicar o fato de se utilizarem doses altas de boro nos solos do Cerrado, onde não é comum a constatação de sintomas de toxidez nas culturas, pois quando se adiciona B ao solo, dependendo da fonte, grande parte desse elemento pode ser perdida por lixiviação.

Pode-se afirmar que até as doses de 12 kg ha⁻¹ de B as fontes mais solúveis como ácido bórico e H₂ boro podem ser utilizadas na adubação em curto prazo por estarem prontamente disponíveis, mas deve-se ter cautela na dose, pois possui estreita faixa entre o ideal e a toxidez, resultado mostrado por Foloni et al. (2010), que avaliando quatro doses de bórax (0; 1; 2 e 3 kg

ha⁻¹) aplicadas no solo e quatro doses de ácido bórico (0; 0,5; 1 e 2 kg ha⁻¹ de B na calda de pulverização) aplicadas via foliar na cultura do girassol, verificaram aumento no tamanho dos grãos de girassol com aumento da adubação boratada, mas em contrapartida, quando se adicionou as doses de 2 e 3 kg ha⁻¹ de B na semeadura da cultura, altas doses de B pulverizadas nas folhas comprometeram a formação de grãos devido a toxidez do micronutriente.

O H₂ boro é a fonte com maior conteúdo do micronutriente independente da camada analisada e de doses, não sendo uma fonte indicada para o suprimento de B via solo, mas podendo ser usada via aplicação foliar, onde se mostrou uma fonte prontamente disponível assim como o ácido bórico, porém com facilidade de aplicação por ser líquida. Caso seja necessário aplicar via solo será necessário ajuste de dose para viabilizar economicamente, mas Wang et al. (1999) demonstraram que a lixiviação de B leva à perda econômica, por outro lado, pode ser um fator de segurança quando se aplicam doses excessivas do nutriente.

As testemunhas (parcelas com as doses 0 kg ha⁻¹ de B), independente da camada de solo, obtiveram valores muito baixos de B lixiviado e não diferiram entre si, comprovando a efetividade das avaliações quando aplicadas as doses e fontes de B. Esse resultado corrobora com Rosolem e Bíscaro (2007) que também constataram que quando foi adicionado B ao solo, na dose de 5 kg ha⁻¹ na forma de ácido bórico, as quantidades de B presentes na água percolada através das colunas de solo foram dez vezes maiores que as quantidades encontradas na testemunha.

A quantidade de água aplicada no decorrer do experimento e o solo utilizado são fatores consideravelmente importantes para os resultados obtidos, pois esta mobilidade de boro no solo também foi observada por Rosolem e Bíscaro (2007) e Oliveira Neto et al. (2009) e se justifica não só pelas doses e fontes aplicadas, mas também pela elevada pluviosidade que ocorreu em solo de textura média e com pH baixo, similarmente ao observado neste experimento.

Tanto a dose quanto a fonte e forma de aplicação na adubação boratada devem levar em consideração a cultura em estudo, pois Dias et al. (2016), avaliando a aplicação de doses (1, 3, 6, 9 e 12 kg ha⁻¹) de B em três tipos de solo não observaram incremento significativo na produção de matéria seca de braquiária, independente da fonte. Já Nomura et al. (2011) afirmam que a adubação diretamente no solo e no orifício do perfilho desbastado de bananeira é mais eficiente no fornecimento de B quando comparadas com a aplicação foliar, sendo assim, aplicar B no solo e nas folhas aumentam os teores disponíveis no solo consideravelmente nas doses de 3 a 4 g planta⁻¹.

Os resultados mostram a importância de estudar as fontes e doses de B, pois Bologna e Vitti (2006), avaliando o efeito de fontes e doses de B sobre os atributos físicos de frutos de

laranja, observaram que as fontes de B influenciaram o diâmetro, sendo obtidos os maiores e menores valores com as fontes de maior e menor solubilidade, respectivamente, ácido bórico e colemanita.

CONCLUSÕES

- Independente da dose aplicada, a fonte ulexita é a que apresenta menor conteúdo de boro solúvel no perfil dos solos analisados e também no líquido lixiviado.
- O ácido bórico é a única fonte que tem comportamento diferente em relação à lixiviação de boro em diferentes camadas de solo e do material lixiviado.
- As fontes mais solúveis, no caso ácido bórico e H₂ boro, independente da dose apresentaram comportamento relativamente semelhante, com maiores conteúdos de B no líquido lixiviado e no perfil do Latossolo utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A.; SOUZA, C.P.C.; ANDRADE, C.A.; ROSSI, R. Lixiviação e Disponibilidade de Boro em Função de Fontes e Características de Solos. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2015, Natal. *Anais*. Natal: SOBAMA, 2015. p. 30-34.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARTUR, A.G. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 18, n.2, p. 141-149, 2014.

AZEVEDO, R.A.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L.R. Adsorção de boro em solos de várzea do Sul de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, p.957-964, 2001.

BOLOGNA, I.R.; VITTI, G.C. Produção e qualidade de frutos de laranja 'pêra' em função de Fontes e doses de boro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 328-330, 2006.

BRITO NETO, J. F.; PEREIRA, W. E.; CAVALCANTI, L. F.; ARAÚJO, R. C.; LACERDA, J.S. Produtividade e qualidade de frutos de mamoeiro 'sunrise solo' em função de doses de nitrogênio e boro. *Semina*, Londrina, v. 32, n. 1, p. 69-80. 2011.

BYERS, D.E.; MIKKELSEN, R.L.; COX, F.R. Greenhouse evaluation of four boron fertilizer material. *Journal of Plant Nutrition*. Monticello. v.24, n.4/5, p.717- 725, 2001.

CAPONE, A.; DARIO, A. S.; MENEGON, M. Z.; FIDELIS, R. R.; BARROS, H. B. Respostas de cultivares de girassol a doses crescentes de boro na entressafra do Cerrado Tocantinense. *Revista Verde*, Pombal, v. 11, n.1, p.43-48, 2016.

COMMUNAR, G.; KEREN, R. Effect of transient irrigation on boron transport in soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.71, p.306-313, 2007.

CORCIOLI, G.; BORGES, J. D.; JESUS, R. P.; Deficiência de macro e micronutrientes em mudas maduras de *Khaya ivorensis* estudadas em viveiro. **Cerne**, Lavras, v. 22 n. 1 p. 121-128, 2016.

DIAS, R. C.; TEXEIRA, P. C.; POLIDORO, J. C.; GONÇALVES, G.M.; ZONTA, E. Efeito de fontes e doses de boro na produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes em plantas de braquiária. **Embrapa Solos**. Rio de Janeiro, ed.1, p.85, 2016.

DOURADO NETO, D.; DARIO, G.J.A.; MARTIN, T.N.; SILVA, M.R.; PAVINATO, P.S.; HABITZREITER, T.L. Adubação mineral com cobalto e molibdênio na cultura da soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, suplemento 1, p. 2741-2752, 2012.

FAVARETTO, N.; MOTTA, A. C. V.; BARCK, C.; LUSTOSA, S.B.; COMIN, J.J. Shoot and Root Response of *Trifolium vesiculosum* to Boron Fertilization in an Acidic Brazilian Soil. In: **Brazilian Archives of Biology and Technology**. Curitiba, p. 597-604, 2007.

FOLONI, J.S. S.; GARCIA, R. A.; CARDOSO; C. L.; TEIXEIRA, J. P; GRASSI FILHO, H. Desenvolvimento de grãos e produção de fitomassa do Girassol em função de adubações boratadas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 273-280, 2010.

GOLDBERG, S.; GLAUBIG, R. A. Boron adsorption on aluminum and iron oxide minerals. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 6, p. 1374-1379, 1985.

HODECKER, B. E. R.; NAIRAM, B.; IVO, S.; VALDIR, D.; JORGE, S.; MARCELO, L. Boron delays dehydration and stimulates root growth in *Eucalyptus urophylla* (Blake, S.T.) under osmotic stress. **Plant and Soil**, Perth, v. 384, p. 185-199, 2014.

LEITE, R. F. C.; SCHUCH, L. O. B.; AMARAL, A.S.; TAVARES, L.C. Rendimento e qualidade de sementes de arroz irrigado em função da adubação com boro. **Revista Brasileira de Sementes**. Londrina, v.33, ed.4, p.785-791, 2011.

LEITE, S. M. M.; MARINO, C.L.; BONINE, C. A. V. Respostas de clones de *Eucalyptus grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla* à supressão de boro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 19-25, 2010.

LIMA, J. C. P. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; LIMA, J. G. C. & LIRA JUNIOR, M. A. Níveis críticos e tóxicos de boro em solos de Pernambuco determinados em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 73-79, 2007.

LONERAGAN, J.F. Plant nutrition in the 20th and perspectives for the 21st century. In: Development in plant and soil sciences, 2011, Tokyo. *Anais Tokyo*: Kluwer Academic Publishers, 1997, p. 3-14.

LORDKAEW, S.; KONGSAENG, S.; JONGJAIDEE, J.; DELL, B.; RERKASEM, B; JANJOD, S. Variation in responses to boron in rice. **Plant and Soil**, Heidelberg, v. 363, n. 1-2, p. 287-295, 2013.

MASCARENHAS, H. A.; ESTEVES, J. A. F.; WUTKE, E. A.; GALLO, P. B. Micronutrientes em soja no Estado de São Paulo. **Nucleus**, Ituverava, v. 11, n. 1, p. 179-198, 2014.

MATTIELLO, E.M.; RUIZ, H.A.; SILVA, I.R.; SARKIS, J.E.S.; NEVES, J.C.L.; PUCCI, M.M. Phloem mobility of boron in two eucalypt clones. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33 n. 6, p. 1695-1704, 2009.

MENDIBURU, F. *Agricolae: Statistical procedures for agricultural research. R package version 1*. 2-8. 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>. Acesso em: 04 de Abr. 2019.

MESQUITA, G. M.; SILVA, S. M. C., BUSO, W. H. D.; SILVA, S. D. Produção de rabanete cultivado sob diferentes doses de boro com presença e ausência de calagem. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 4, n. 2, p. 18 – 26. 2011.

MIWA, K.; FUJIWARA, T. Boron transport in plants: coordinated regulation of transporters. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, n. 7, p. 1103-1108, 2010.

MORTVEDT, J.J. Needs for controlled-availability micronutrient fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, n.38, p.213-221, 1994.

MURPHY, L.S.; WALSH, L.M. Fertilizer applications for correcting micronutrient

deficiências. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; INDSAY, W.L. Micronutrients in agriculture. Madison: Soil Science Society of America. 1972, cap 15, p.347-387.

MUSSKOPF, C.; BIER, V. A. Efeito da aplicação de fertilizante mineral cálcio e boro via foliar na cultura da soja (*Glycine Max. L.*). **Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 3, n. 4, p, 83-91, 2010.

NOMURA, E. S.; TEXEIRA L. A. J.; BOARETTO, R. M.; GARCIA, V.A.; FUZITANI, E.J.; JUNIOR DAMATTO, E. R.; SAES, L. A.; JUNIOR MATTOS, D. Aplicação de boro em bananeira - Boron application in banana plant. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, v.33, n.2, 2011.

OLIVEIRA NETO, W.; MUNIZ, S. A.; SILVA, G. A. M.; CASTRO, C.; BORKERT, M. C. Boron extraction and vertical mobility in Paraná State Oxisol, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. Viçosa, v. 33, p. 1259 – 1267, 2009.

R CORE TEAM. 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing.

ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n. 10, p. 1473-1478, 2007.

RYAN, G. M.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, A. R.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. C. Factors controlling Eucalyptus productivity: how water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010.

SALTALI, K.; BILGILI, A.V.; TARAKCIOGLU, C.; DURAK, A. Boron adsorption in soils with different characteristics. **Asian Journal of Chemistry**, v. 17, p. 2487-2494, 2005.

SILVA, F. C. Análise química de tecido vegetal. In: Manual de Análises Químicas de Solo, Plantas e Fertilizantes, 2009. Brasília. *Anais*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 193-204.

SILVA, N.M.; CARVALHO, L.H.; KONDO, J.I.; BATAGLIA, O.C.; ABREU, C.A. Dez anos de sucessivas adubações com boro no algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 54, p. 177-185, 1995.

TRAUTMANN, R. R.; LANA, M. C.; GUIMARÃES, V. F.; GONÇALVES JR, A. C.; STEINER, F. Potencial de água do solo e adubação com boro no crescimento e absorção do nutriente pela cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 240-251, 2014.

TISDALE, S. L.; NELSON, W.L. Sulfur and micronutrients in soils and fertilizers. In: Soil fertility and fertilizers, 1966. New York. *Anais*. New York: The MacMillan Company, second edition, 2009. p. 694.

WANG, K.; YANG, Y.; BELL, R.W.; XUE, J.M.; YE, Z.Q.; WEI, Y.Z. Low risks of toxicity from boron fertilizer in oilseed rape-rice rotations in Southeast China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Amsterdã, v. 54, p. 189-197, 1999.

WICKHAM, H. *Elegant Graphics for Data Analysis - 2nd Edition*, 2016. **Springer-Verlag**. Disponível em: <http://www.springer.com/gp/book/9783319242750>. Acesso em: 04 de Abr. 2019.

ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em Latossolos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 389- 400, 2010.