



ÉDER LUCAS CORRÊA DOS SANTOS

**AGRONOMIC EFFICIENCY AND RESIDUAL EFFECT OF A
NOVEL SOURCE OF BORON FOR TROPICAL SOILS**

**LAVRAS-MG
2020**

ÉDER LUCAS CORRÊA DOS SANTOS

**AGRONOMIC EFFICIENCY AND RESIDUAL EFFECT OF A NOVEL SOURCE OF
BORON FOR TROPICAL SOILS**

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

Prof. Luiz Roberto Guimarães Guilherme, Ph.D.
Orientador

**LAVRAS-MG
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

dos Santos, Éder Lucas Corrêa.

Agronomic efficiency and residual effect of a novel source of boron for tropical soils / Éder Lucas Corrêa dos Santos. - 2020.
63 p. : il.

Orientador(a): Luiz Roberto Guimarães Guilherme.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Lixiviação. 2. Micronutriente. 3. Solubilização. I. Guilherme, Luiz Roberto Guimarães. II. Título.

ÉDER LUCAS CORRÊA DOS SANTOS

**AGRONOMIC EFFICIENCY AND RESIDUAL EFFECT OF A NOVEL SOURCE OF
BORON FOR TROPICAL SOILS**

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme

APROVADA em 20 de março de 2020.

Dr. Fábio Aurélio Dias Martins
Dr. Leonarduz Vergutz,
Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

FAPEMIG
UFV
UFLA

Prof. Luiz Roberto Guimarães Guilherme, Ph.D.

**LAVRAS-MG
2020**

A Deus, por sempre iluminar meu caminho e ter me abençoado com essa maravilhosa oportunidade.

A meus pais e meu irmão, pelo apoio incondicional e por não medirem esforços a minha formação.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por abençoar minha vida das mais diversas formas.

Aos meus pais, Marcos e Bárbara, por todo amor, incentivo, por serem exemplos de conduta e esforço.

Ao meu irmão, Thiago, por ser o melhor amigo que alguém poderia ter, sempre.

À minha avó, Santina (*in memoriam*) e à tia Piúca, por terem me ensinado que as coisas mais simples são, também, as mais valiosas.

Ao professor e orientador Luiz Roberto Guimarães Guilherme, Bebeto, pela oportunidade e pelo exemplo de profissionalismo e dedicação.

Ao Fábio Aurélio, pelos conselhos, sugestões e ajuda sem os quais eu não teria conseguido concluir essa etapa da minha vida.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos e auxílio financeiro para a condução do projeto de pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo e todos os seus trabalhadores, principalmente Dirce, Livia, Mariene, Geila, Aline, José Roberto (Pezão), Milton e Roberto, pela oportunidade de ter convivido com ótimos profissionais.

Ao professor do IFTM Márcio Santana e aos alunos Marcos e Ana Paula, por toda ajuda no experimento de campo.

À Cynthia, sempre disposta a me ajudar e aconselhar.

Aos companheiros e amigos do DCS, Corguinha, Filipe, Marina, Maila, Gustavo, Ruby, Ediu, César, Ana Paula, Aline, Rafael e todos os outros (principalmente os que formaram grupos de trabalho comigo) pelo convívio e cooperação.

A todos os veteranos e calouros da República Mata Burro, bem como à D. Lourdes e à Flaviane. Vocês sempre serão a minha segunda família.

Aos membros da banca, por terem aceitado o convite.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

MUITO OBRIGADO!

“Walk on, walk on
With hope in your heart
And you’ll never walk alone
You’ll never walk alone”

Richard Rodgers

RESUMO

A deficiência de boro (B) limita a produção em muitas áreas agrícolas em todo o mundo, principalmente em regiões com alta pluviosidade. Além disso, fornecer uniformemente as baixas taxas recomendadas em grandes áreas se mostra um desafio, especialmente com o estreito intervalo entre deficiência e toxicidade desse nutriente para as plantas. O Cerrado brasileiro é uma das principais regiões agrícolas do mundo. No entanto, os solos desta região são naturalmente pobres em nutrientes, devido ao processo de intemperismo. Por conta do alto regime de chuvas nesta vasta área tropical, a lixiviação de B e sua consequente limitação das potenciais produções se mostra bastante provável. Este estudo avaliou o efeito residual e a eficiência agrônômica de uma nova fonte de B para duas culturas em solo de Cerrado em estufa e em condições de campo. Foram utilizadas culturas representativas na região, sendo soja como primeira safra e milho, como segunda. Diferentes fontes de B combinadas com cloreto de potássio (KCl) em um mesmo grânulo de fertilizante, visando uma distribuição uniforme de nutrientes, foram aplicadas aos solos e, então, foi feita uma lixiviação forçada, no teste de casa de vegetação, antes do plantio da primeira safra. Após a primeira colheita, o milho foi plantado como segunda safra sem adubação com B, para avaliar o efeito residual das diferentes fontes. As fontes de boro incluíram um novo fertilizante em sua antiga formulação como fonte B de liberação rápida (borato de sódio) e uma nova formulação como fonte B de liberação rápida e lenta (borato de sódio e colemanita) para disponibilidade de B durante toda a temporada para a planta e para evitar perdas de B. A nova fonte de B proporcionou uma redução da lixiviação de B (~ 69%), em comparação com a formulação antiga do fertilizante B (~ 82%) e colemanita (~ 74%). Na soja, não houve diferença estatística entre as diferentes fontes de B no número médio de sementes e no número de sementes por vagem, bem como no rendimento de grãos da soja, embora a nova formulação de fertilizante tenha apresentado uma maior eficiência de absorção do que a antiga formulação, sob condições de ambiente controlado. A segunda safra - milho - apresentou maior teor de B no caule para as fontes de menor solubilidade, mas não houve diferença estatística para o teor de matéria seca, bem como para o número de espigas e peso de espigas, mostrando que o efeito residual não foi suficiente para que houvesse uma diferença estatística nos parâmetros de produtividade. Em condições de campo, as diferentes fontes de B não apresentaram diferença na matéria seca e nos parâmetros de produção no estágio de floração, embora as fontes de B menos solúveis em água tenham proporcionado um maior teor de B nas vagens. A segunda safra foi afetada por uma geada, tendo que ser interrompida antes da maturidade das plantas. Não houve diferença estatística no acúmulo total na parte aérea e no peso da matéria seca, sugerindo que as diferentes fontes de B avaliadas não tiveram efeito residual nas condições de campo testadas.

Palavras-chave: Lixiviação. Micronutriente. Fertilizante de Liberação Lenta. Solubilização.

ABSTRACT

Boron (B) deficiency limits yields in many croplands worldwide, particularly in high rainfall regions. However, it is very challenging to evenly deliver the low recommended rates over large areas, especially with the narrow window between deficiency and toxicity in plants. The Brazilian Cerrado is one of the most significant agricultural regions worldwide, but the soils are naturally impoverished in nutrients because of the weathering process. Due to the high rainfall regime in this vast tropical area, B leaching is likely to occur and limit potential yields. This study evaluated the residual effect and the agronomic efficiency of a novel B source for two crops on a Cerrado soil under glasshouse and field conditions. Crops were selected based on their representativeness in the region, as follows: soybean as the first crop and corn as the second. Different sources of B combined with muriate of potash (MOP) for even nutrient distribution were applied to soils and leaching was forced at the glasshouse trial, before planting the first crop. After the first crop harvest, corn was planted as a second crop without B fertilizing, to evaluate the different sources residual effect. Boron sources included a novel fertilizer in its old formulation as fast-release B source (B as sodium borate) and a new formulation as a fast- and slow-release B source (B as sodium borate and colemanite) for season-long B availability to the plant and to prevent B losses. The new B source provided a reduction of B leaching (~69%), compared with the old formulation of the B fertilizer (~82%) and colemanite (~74%). For soybean, there was no statistical difference among the different B sources on the average number of seeds and number of seeds per pod, as well as on grain yield for soybean, but the new fertilizer formulation presented a higher uptake efficiency than the old formulation, under glasshouse conditions. The second crop - corn - showed higher stalk B contents for the lower solubility sources, but no statistical difference for dry matter contents, as well as the number of corn ears and corn ear weight, showing that the residual effect was not enough to provide a statistical difference in production parameters. Under field conditions, the different sources of B showed no difference in dry matter and yield levels in the flowering stage, although less soluble sources of B provided a greater B content in the pods. The second crop - corn - was affected by frost, which interrupted the trial before the maturity stage of the plants, yet there was no statistical difference in total shoot uptake and dry matter weight. The different B sources had no residual effect on the tested field conditions.

Keywords: Leaching. Micronutrient. Slow Release Fertilizer. Solubilization.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 12 |
| 2.1 Agricultura no Cerrado brasileiro..... | 12 |
| 2.2 Boro em agroecossistemas tropicais..... | 14 |
| 2.3 Boro no solo e na planta..... | 14 |
| 2.4 Fontes de Boro | 17 |
| 2.5 Inovações em fertilizantes e tecnologias de aplicação..... | 19 |
| REFERÊNCIAS | 21 |
| SEGUNDA PARTE – ARTIGO..... | 27 |
| RESIDUAL EFFECT AND AGRONOMIC EFFICIENCY OF A NOVEL SOURCE OF BORON FOR TROPICAL SOILS..... | 27 |

1 INTRODUÇÃO

O boro (B), nome derivado do persa “burah”, é considerado um semimetal que ocorre em quantidades traço nas principais reservas do planeta (ÖZKUL et al., 2017). Warington é creditado como o primeiro a provar a essencialidade do B para as plantas (BLEVINS & LUKASZEWSKI, 1998), em 1923. Desde então, o interesse nesse elemento tem sido de descobrir seu papel nas plantas (HU & BROWN, 1994). Ele é necessário para que haja o crescimento vegetal, embora o espaço entre as concentrações desejadas e tóxicas seja estreito, encaixando-o na condição de micronutriente (KOŹLECKI & POLOWCZYK, 2015; SINGH & DWIVEDI, 2019). Essa janela entre a escassez e a toxicidade é a menor entre todos os micronutrientes (PRINCI et al., 2016), sendo este elemento também o maior causador de deficiência dentre todos os micronutrientes. Dessa forma, é considerado um elemento chave, especialmente nas regiões tropicais, que normalmente apresentam baixa disponibilidade desse elemento (MATTOS et al., 2017). Assim, a adubação adequada em B é necessária para grandes produtividades (BLEVINS & LUKASZEWSKI, 1998).

Os solos arenosos são os mais pobres em micronutrientes no geral, dentre eles o B (MALAVOLTA et al., 1991). Na região do Cerrado brasileiro, mais da metade das áreas apresentam deficiência desse elemento (LOPES & GUILHERME, 2016). No entanto, a aplicação desse micronutriente é um desafio já que o seu fornecimento em aplicação isolada não é uma prática rentável e a mistura de grânulos normalmente resulta em uma distribuição desuniforme (ABAT et al., 2015). Além disso, o uso de fontes solúveis de B é problemático pois, logo após a sua aplicação, elas podem prover grandes concentrações de boro no solo e lixiviar rapidamente, gerando um suprimento deficiente para a planta em fases posteriores do seu desenvolvimento (SHORROCKS, 1997). Por outro lado, o uso exclusivo de produtos de baixa solubilidade pode providenciar o fornecimento necessário em fases tardias, mas suprir insuficientemente nas fases iniciais da cultura, trazendo baixas produtividades (SILVA, 2018).

Desse modo, há a necessidade de que haja um produto que tenha fontes de liberação tanto imediata quanto lenta para as plantas, que supra essas necessidades tanto no curto prazo quanto ao longo do tempo, atendendo ao máximo as especificidades de aplicação do elemento B.

A soja [*Glycine max.* (L.) Merrill] pode ser considerada uma das mais importantes fontes de proteína do mundo. Hoje em dia, o Brasil é o segundo maior produtor mundial do grão, com produção correspondente a, aproximadamente, 31,7% do total mundial. O principal mercado consumidor da soja brasileira é a China (LIMA et al., 2018). Análises da FAO indicam que a

produção de soja no Brasil está aumentando cerca de 37% entre 2015 e 2025 (OCDE/FAO, 2015).

O milho (*Zea mays*) é um dos cereais mais difundidos e plantados ao redor do mundo (OLIVEIRA et al., 2018), sendo a segunda cultura mais plantada no Brasil (IBGE, 2019). Dada a importância dessas culturas e do Cerrado para a agricultura brasileira, justifica-se o estudo de novos fertilizantes, dentre eles nas necessárias novas fontes de B, voltados para a região tropical.

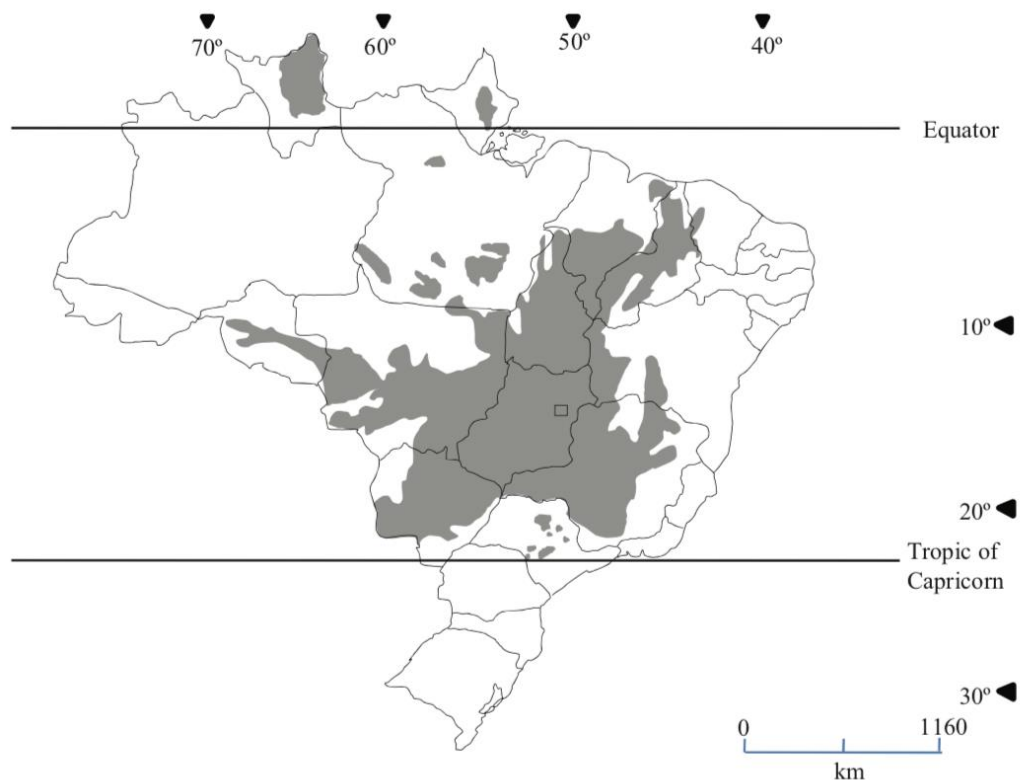
Sendo assim, esse estudo se propôs a testar um novo fertilizante fonte de B, com cloreto de potássio como fertilizante carreador, tanto no que se refere à sua eficiência agrônômica quanto ao efeito residual no solo, a partir do plantio de duas safras: a soja, na primeira, e o milho, na segunda.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Agricultura no Cerrado brasileiro

A região do Cerrado faz parte do ecossistema de savanas. Ela se concentra em 11 estados e no Distrito Federal, conforme mostrado na Figura 1. Trata-se de uma região com baixa densidade populacional com grande processo de urbanização (GOEDERT, 1989).

Figura 1 - Distribuição da área de Cerrado no Brasil.



Fonte: LOPES & GUILHERME (2016).

Até a década de 1970, a região brasileira do Cerrado era considerada secundária para a produção agrícola. Todavia, tecnologias desenvolvidas por cientistas do Centro de Pesquisa do Cerrado, dentre outras instituições, mudou completamente essa situação (LOPES, 1996). A ascensão do Brasil como “*player*” agrícola primário no mundo é amiúde creditada à expansão aos solos de Cerrado. Entretanto, esses solos são deficientes em nutrientes e tendem à degradação, podendo incorrer em baixa eficiência produtiva, precisando de processos intensivos de melhoria dessas características (RADA, 2015).

A área de Cerrado ocupa 2,04 milhões de quilômetros quadrados (23% da área total do país). Dessa área, estima-se que dois terços (aproximadamente 1,36 milhões de quilômetros quadrados) podem ser usados para agricultura, pecuária ou produção florestal. No entanto, a maior parte dela é formada por solos altamente intemperizados com sérias limitações para produção agrícola, pela sua baixa fertilidade natural. Tais solos são ácidos e têm baixa disponibilidade de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), molibdênio (Mo) e zinco (Zn). Também há alta saturação por alumínio (Al^{3+}) e elevada capacidade de fixação de P (LOPES, 1996). Existem ainda outros desafios: entre 5 e 6 meses de estação seca, com abrangência de abril a setembro; veranicos, que são janelas de seca com duração entre 1 e 3 semanas durante a época chuvosa, geralmente ligadas a altas taxas de evapotranspiração; capacidade de retenção hídrica, mesmo em solos argilosos; desenvolvimento limitado das raízes de várias culturas, devido à toxidez de Al^{3+} , por vezes associada à deficiência de Ca^{2+} em camadas de subsuperfície do solo (LOPES & GUILHERME, 1994).

Face à essas adversidades, pode-se dizer que o avanço da agricultura na região brasileira do Cerrado é uma das maiores conquistas da ciência agrícola mundial no século XX (LOPES & GUILHERME, 2016). A partir da década de 70, houve uma expansão da cultura da soja na região Centro-Oeste, por conta do desenvolvimento de cultivares adaptadas às diferentes regiões do Brasil (BEDIN, 2002).

Dentro dessa perspectiva, as características da região permitem que haja o crescimento favorável para a maioria das culturas de interesse comercial (GOEDERT, 1989). O melhoramento de plantas, que possibilitou o surgimento de variedades capazes de serem plantadas em diferentes épocas, possibilitou também o sistema de dupla safra aplicado a esse bioma, conhecido popularmente como “safrinha” em todo o Brasil (ABRAHÃO & COSTA, 2018). A região de Cerrado apresenta, ainda, declives suaves e boa estabilidade dos agregados de solos. Tais aspectos, somados a boas condições de drenagem e profundidade auxiliam no processo de mecanização agrícola (LOPES & GUILHERME, 1994), fator importante para o aumento de produtividade agrícola, uma vez corrigida a fertilidade do solo. Atualmente, quatro países (Estados Unidos, Brasil, Argentina e China) concentram aproximadamente 90% da produção mundial de soja (EMBRAPA, 2019; USDA, 2019). E a expansão da agricultura brasileira no Cerrado com certeza foi um dos fatores decisivos para que o país alcançasse esse patamar.

2.2 Boro em agroecossistemas tropicais

O B, juntamente com o Zn, é o microelemento com maior frequência de deficiência nos solos mundo (SILLANPÄÄ, 1982)

O Brasil pode ser considerado uma fazenda global (TOLLEFSON, 2010), pois é um dos líderes mundiais em produção e fornecimento de alimentos e produtos agrícolas (OECD / FAO, 2015), principalmente devido à contribuição das áreas produtivas de Cerrado.

No entanto, nessa região conhecida como Cerrado Brasileiro, estima-se que 60% das áreas apresentam deficiência de B (LOPES & GUILHERME, 2016). Estudos pioneiros, mostram um aumento da produção de algodão entre 80-90% com o uso de fertilizantes com fontes de B em solos de Cerrado (McCLUNG et al., 1961). Considera-se que um teor de 0,5 mg dm⁻³ de B extraído pelo método de água quente seja o nível crítico para esse nutriente nesse agroecossistema (SOUSA, 1989; LOPES & GUILHERME, 2000).

Sendo assim, há necessidade de estudos que possam avaliar o efeito do fornecimento de micronutrientes, como o boro, e o efeito residual de fertilizantes em solos de região tropical, quer permitam aumentos de produtividade na região de Cerrado.

2.3 Boro no solo e na planta

É conhecido que vários fatores afetam a disponibilidade dos micronutrientes da solução do solo para as plantas, tais como: pH, teor de matéria orgânica do solo, temperatura, umidade e luz. O aumento do pH, por exemplo, aumenta a adsorção do B pelo solo, tornando esse elemento menos disponível. A disponibilidade e a absorção de B diminuem drasticamente com o pH maior que 6,0 (FAGERIA et al., 2002).

Na solução do solo, o B é encontrado principalmente na forma de ácido bórico (H₃BO₃) ou borato (B(OH)₄⁻), em alto pH, já que sua constante de dissociação (pK_a) é 9,24 (DEGRYSE, 2017). A adsorção do boro pelos componentes do solo normalmente é fraca, e pode acontecer por argilas de filossilicato (GOLDBERG et al., 1993), óxidos e hidróxidos (GOLDBERG & GLAUBIG, 1985), carbonatos minerais (GOLDBERG & FOSTER, 1991) e matéria orgânica (GU & LOWE, 1990).

O boro contido no solo é computado de duas maneiras: total e disponível, sendo o B total representado pelas formas compreendidas nos minerais, matéria orgânica do solo (MOS),

adsorvida ou fixada, sendo que essas não são absorvidas pelas raízes dos vegetais, além do B da solução do solo, que é absorvido (DANTAS, 1991).

A fração de B disponível compreende as formas inorgânicas sujeitas a dissolução e o B ligado à matéria orgânica do solo, que pode ser mineralizada (DANTAS, 1991). Sabe-se que a resposta das plantas à adubação com B pode variar com uma série de fatores: teor de B do solo, espécie, cultivar, época da adubação, regime de chuvas, entre outros (ZHANG et al., 2015; MERIÑO-GERGICHEVICH et al., 2017).

A maioria dos autores tem afirmado que o método de extração do B disponível mais eficiente é aquele que usa água quente (BRASIL SOBRINHO, 1965; DANTAS, 1991; VANDERLEY, 1984; RUY, 1986). Embora menos de 5% do B total do solo esteja disponível para as plantas (BERGER & TRUOG, 1940), há uma correlação positiva e significativa entre o teor de B total do solo e o B solúvel em água quente, mostrando que o B total do solo pode ser usado como índice de disponibilidade aos vegetais (GUPTA, 1968).

Os teores de B, pelo método de extração com água quente, entre 0,1 e 0,7 mg dm⁻³ são insuficientes para que haja desenvolvimento normal das plantas; entre 0,7 e 1,0 mg dm⁻³ são considerados os que permitem crescimento normal das plantas; e entre 1,0 e 5,0 mg dm⁻³ são danosos às plantas (CASAGRANDE, 1978).

Na solução do solo, o ácido bórico, H₃BO₃, é a forma predominante até o pH de 9,2, quando a passa a predominar a forma iônica, H₂BO₃⁻ (DANTAS, 1991), forma que é encontrada a partir do pH 7,0 (CAMARGO, 1991).

O B disponível é encontrado principalmente na matéria orgânica do solo (MOS), o que faz com que os teores mais elevados de B estejam na camada superficial do solo (BERGER; TRUOG, 1940). Seus teores também são maiores na fração argila, seguida pela fração silte e, por último, na fração areia (OLSON; BERGER, 1946). A capacidade de retenção do B é maior nos solos argilosos, não só pela capacidade de adsorção, mas também pela energia dessa adsorção (BIGGAR; FIREMAN, 1960).

O boro é o único nutriente para plantas que é absorvido pelas mesmas não como um íon, mas como uma molécula sem carga (MARSCHNER, 1995; MIWA & FUJIWARA, 2010). Ele também interage com outros nutrientes, sendo que altas concentrações de nitrogênio amoniacal ou nítrico no solo diminuem os teores de B nas folhas das plantas (CAMARGO & SILVA, 1975). A absorção do B pelas raízes das plantas é intimamente relacionada ao pH e à sua concentração na solução do solo, provavelmente por um processo não metabólico (BROWN; HU, 1998).

O B nativo do solo encontra-se em compostos que o liberam de maneira muito lenta para a solução do solo, nesse caso, a lixiviação do nutriente não é tão intensa (CAMARGO, 1991).

Nos vegetais, cerca de 80% a 90% do B está localizado na parede celular (HU; BROWN, 1994). As plantas retiram B da solução do solo na forma de ácido bórico, uma pequena molécula sem carga que pode se difundir livremente através das camadas duplas das membranas, seguindo o gradiente de concentração (BROWN et al., 2002).

Em plantas, o B tem por principais funções: ativar certas enzimas desidrogenases, também está envolvido no metabolismo de carboidratos, na síntese de componentes da parede celular, além de representar um importante papel na divisão celular, bem como no alongamento celular (FAGERIA; BALIGAR; CLARK, 2002) (TAIZ et al. 2017). Em células vegetais, mais de 99,95% do B está presente na forma H_3BO_3 , enquanto a parte remanescente é formada por borato $[B(OH)_4^-]$ (PRINCI et al., 2016). Ambas as formas são capazes de reagir rapidamente para formar complexos com uma variedade de compostos contendo grupos cis-diol, gerando ésteres cíclicos estáveis de borato (KOT et al., 2016).

Uma vez absorvido, o B não tem mobilidade no floema das plantas (TAIZ et al. 2017), não havendo redistribuição. Por conta disso, os sintomas de uma eventual deficiência desse nutriente ocorrem primeiramente nos órgãos mais novos e regiões de crescimento (HU & BROWN, 1997). A deficiência em boro é relativamente comum em plantas (CONG et al. 2015). Os sintomas da deficiência do B são variados, com os mais comuns sendo: alterações nas paredes celulares, que alteram suas propriedades mecânicas e não se expandem normalmente. A falta de B também pode inibir o crescimento de tecidos e desenvolvimento apical, diminuição do crescimento da planta, aborto de flores, entre outros sintomas (BROWN et al., 2002). Também pode ocorrer necrose em frutos, tubérculos e raízes, devido à fragmentação de tecidos internos (TAIZ et al., 2017).

Outra característica do B em plantas é a seu estreito intervalo entre os teores deficientes e tóxicos (SILVA et al., 2018). A toxicidade causada por B é uma desordem de alta significância que compromete tanto a produtividade quanto a qualidade da cultura (PRINCI et al., 2016). Os sintomas típicos de toxicidade do boro se dão na região marginal das folhas maduras, com elas se tornando cloróticas ou necróticas (OZTURK et al., 2010).

Assim sendo, fontes de B que não sejam lixiviadas e estejam disponíveis para as plantas nos solos tropicais, como a testada nesse estudo, se fazem necessárias.

2.4 Fontes de boro

Com o aumento da população mundial, houve a necessidade de desenvolver e aplicar novas tecnologias para uma maior produção de alimentos por unidade de área (STEWART et al., 2005). O correto manejo do solo para altas produtividades é necessário pois o solo, por si só, pode prover um nível baixo de produtividade, quando seu manejo é mínimo (FOTH & ELLIS, 1997).

Assim, a obtenção e o fornecimento de nutrientes para uma cultura são determinantes, em conjunto com outras variáveis, para sua produção (OKUMURA et al., 2011). Grandes aumentos na produtividade das plantas cultivadas ocorreram desde a Segunda Guerra Mundial, devido, principalmente, ao melhoramento genético e ao uso de fertilizantes (FOTH & ELLIS, 1997). Estima-se, por exemplo, que entre 30% e 50% da produtividade de grão dos Estados Unidos possa ser atribuída ao uso de fertilizantes (NELSON, 1990). Dentre esses está o fertilizante Aspire[®], fonte de B a ser testada nesse trabalho, que é produzido a partir de fontes de diferentes solubilidades de B associados ao cloreto de potássio, que tem sido amplamente utilizada em todo o mundo.

A origem desses fertilizantes está intimamente ligada às formas inorgânicas de B. Elas são normalmente encontradas em água, solo e atmosfera. Na crosta terrestre, o B ocorre em minerais silicatados na proporção de aproximadamente 10 mg kg⁻¹. Ele pode ser encontrado como borossilicato em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. O intemperismo natural nas rochas sedimentares é creditado como a principal fonte de compostos de B na água e no solo. Os principais depósitos globais de B estão localizados nos Estados Unidos, Austrália, China, Rússia, Argentina e Turquia (PRINCI et al., 2016). A Turquia é o maior produtor de B do mundo, com todos os seus depósitos ocorrendo na sua parte ocidental, parte esta que concentra 73% das reservas mundiais (ÖZKUL et al., 2017).

Embora o termo “borato” seja um sal de ácido bórico (composto que contém B₂O₃), esse termo também pode representar qualquer composto que contenha óxido de boro. Um grande número de minerais na natureza contém B₂O₃ em sua composição. Três podem ser considerados os mais conhecidos, devido à sua importância comercial, sendo eles o bórax, a ulexita e a colemanita (ÖZKUL et al., 2017).

O borato de sódio, ou bórax, (Na₂B₄O₇·10H₂O), e o ácido bórico (H₃BO₃), são os fertilizantes mais comuns contendo B. Ambos são solúveis em água (MATTOS et al., 2017) e ficam facilmente disponíveis para a assimilação das plantas, mas ao mesmo tempo podem ser rapidamente lixiviados da zona de absorção das raízes (SALEEM et al., 2011).

As fontes de liberação lenta de B mais usadas são os minérios moderadamente solúveis (DEGRYSE, 2017). Esses minérios triturados, como ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) e colemanita ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) também são usados como fertilizantes. Esses minérios podem ser um pouco menos solúveis que os produtos refinados devido à composição do minério e à quantidade de material insolúvel, que pode variar de acordo com a fonte (BELL & DELL, 2008). É calculado que a ulexita seja cerca de 10 vezes mais solúvel que a colemanita (ABAT et al., 2014).

Diferentes solubilidades em água dessas fontes de B podem ser importantes para o gerenciamento da adubação, já que o uso de somente fontes mais solúveis podem aumentar o risco das perdas no perfil do solo por lixiviação, podendo também gerar uma alta concentração de B na solução do solo logo após a aplicação, o que pode ser perigoso para as plantas em estádios iniciais de desenvolvimento (SHORROCKS, 1997; BRENNAN et al., 2015).

O efeito residual de fertilizantes contendo boro é maior em solos com alto teores de silte e argila (LOPES, 1999). Sintomas de toxidez podem ser encontrados quando altas doses de aplicação ocorrem em conjunto com baixa pluviosidade (GIMENO et al., 2012).

No entanto, além da lenta liberação exigida a esses fertilizantes, para que supram as necessidades da planta ao longo do tempo, as recomendações de fertilizantes são feitas assumindo implicitamente que a aplicação será uniforme no campo (SILVA, 2018). Entretanto, esse pressuposto é falho para os micronutrientes, por conta da dificuldade de se aplicar precisamente suas baixas recomendações (MORTVEDT & WOODRUFF, 1993). Para que esse problema seja superado e ganhos agrônômicos sejam alcançados, fertilizantes granulados boratados normalmente são misturados com formulações de N-P-K e aplicados como misturas de grânulos (SILVA, 2018). Todavia, as fontes de B normalmente não têm o mesmo tamanho ou densidade dos fertilizantes fonte de macronutrientes (MORTVEDT, 1968), incorrendo em adaptações para a sua aplicação.

Outro problema a ser solucionado para a aplicação de pequenas quantidades de nutrientes em grandes áreas é combinar a demanda da planta com a liberação do nutriente. Um fertilizante ideal de B deveria fornecer B de forma ajustada à curva de absorção da cultura, desde a semeadura até o crescimento reprodutivo, quando o B é particularmente importante (SILVA, 2018). O uso de fontes B com diferentes características de solubilidade pode solucionar possíveis casos de toxidez, bem como minimizar as perdas de lixiviação e, assim, cumprir a demanda por fertilizantes com maior eficiência de uso e, assim, atender melhor aos requisitos da sustentabilidade.

2.5 Inovações em fertilizantes e tecnologias de aplicação

O uso de fertilizantes na agricultura está intimamente ligado à sustentabilidade dos sistemas de produção de alimentos. Grande parte dos nutrientes não fica disponível para as plantas, sendo perdida. Essa quantidade de nutrientes que é perdida, ultrapassa os limites aceitos como seguros e sustentáveis (BINDRABAN et al., 2020).

Além disso, a não utilização de micronutrientes na fertilização química do solo também se mostra um problema. A maior parte, entre 90 e 95%, o mercado de fertilizantes é composta por fontes NPK (RESEARCH & MARKETS, 2017). Muito tempo seguido usando apenas essas formulações reduziram os estoques naturais de micronutrientes em grande parte dos solos do planeta (BINDRABAN et al., 2020). É essencial que os micronutrientes sejam usados na agricultura, visto que culturas bem nutridas em macro e micronutrientes de forma equilibrada se mostram mais resistentes ao estresse ambiental (BINDRABAN et al., 2020), e também têm o rendimento melhorado, bem como a qualidade do produto (IERNA et al., 2017).

A Comissão EAT-Lancet de Alimentos, Planeta e Saúde estabelece que a intensificação agrícola de modo sustentável, bem como a adoção de boas práticas para o solo, para que haja uma melhoria na eficiência dos nutrientes (WILLETT et al., 2019). A eficiência da adubação com nutrientes ainda é baixa, mesmo hoje em dia, com média mundial de 40% para fertilizantes no geral (BOUWMAN et al., 2017). Estratégias de aumento na eficácia dos sistemas de produção se mostram necessárias, e os fertilizantes desempenham uma função primordial nesse objetivo (BINDRABAN et al., 2020). Bindraban et al. (2015) clamam para que haja uma mudança padrão de recomendação e fornecimento de fertilizantes para as plantas, tendo como ponto de partida o melhor entendimento dos processos fisiológicos das plantas, no lugar de levar a química primeiramente em consideração. Ajustar as necessidades nutricionais das plantas nas condições predominantes de solo, clima e cultivo por meio de fertilizantes pode trazer benefícios diretos e indiretos à saúde humana e ecológica (BINDRABAN et al., 2018). As intervenções com fertilizantes devem atender às condições específicas de cultivo do solo do local para alcançar uma eficácia mais significativa (KIHARA et al., 2017).

As inovações em fertilizantes e tecnologias de aplicação podem, também, impedir uma eventual superdosagem de micronutrientes, por meio de diferentes estratégias, como o revestimento de fertilizantes NPK com micronutrientes (SANTOS et al., 2018), no lugar da mistura a granel.

Outra estratégia que pode ser usada na fabricação de fertilizantes com vários nutrientes é a compactação. Esse método pode resultar em um novo produto, sem comprometer as características de manuseio e armazenamento (FERGUNSON et al., 2019).

Teoriza-se que o KCl é um macronutriente adequado para carregar o B, devido ao seu uso em escala global e estabilidade química (SILVA, 2018). Diante do exposto, o presente estudo visou testar a eficiência agrônômica e efeito residual de um novo fertilizante, com fontes de diferentes solubilidades de B associadas ao KCl.

REFERÊNCIAS

ABAT, M. et al. Slow-release boron fertilisers: co-granulation of boron sources with mono-ammonium phosphate (MAP). **Soil Research**, v. 53, n. 5, p. 505-511, 2015.

_____. Formulation, synthesis and characterization of boron phosphate (BPO₄) compounds as raw materials to develop slow-release boron fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 6, p. 860-868, 2014.

ABRAHÃO, G. M.; COSTA, M. H. Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256-257, p. 32-45, 2018.

BEDIN, I. **Fertilizantes fosfatados na cultura da soja**. 2002. 65 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

BELL, R. W.; DELL, B. **Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy Production**, Paris: IFA, 2008.

BERGER, K. C.; TRUOG, E. Boron availability in relation to reaction and organic matter content. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 10, p. 113-116, 1940.

BIGGAR, J. W.; FIREMAN, M. Boron absorption and release by solis. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 24, p. 115-120, 1960.

BINDRABAN, P.S.; DIMKPA, C.O.; WHITE, J.C.; et al. Safeguarding human and planetary health demands a fertilizer sector transformation. **Plants, People, Planet**. 2020;00:1–8. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10098>

BINDRABAN, P. S., DIMKPA, C., ANGLE, S., & RABBINGE, R. (2018). Unlocking the multiple public good services from balanced fertilizers. **Food Security**, 10, 273–285. <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0769-4>

BINDRABAN, P. S., DIMKPA, C., NAGARAJAN, L., ROY, A., & RABBINGE, R. (2015). Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. **Biology and Fertility of Soils**, 51, 897–911. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>

BOUWMAN, A. F., BEUSEN, A. H. W., LASSALETTA, L., VAN APELDOORN, D. F., VAN GRINSVEN, H. J. M., ZHANG, J., & VAN ITTERSUM, M. K. (2017). Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on crop- land. **Scientific Reports**, 7, 40366. <https://doi.org/10.1038/srep40366>

BLEVINS, D; LUKASZEWSKI, K. Boron in Plant Structure and Function. **Annual review of plant physiology and plant molecular biology**, v. 49, p. 481-500, 1998.

BRASIL SOBRINHO, M. O.C. **Levantamento do teor de boro em alguns solos do Estado de São Paulo**. Piracicaba, 1965, 135p.

BRENNAN, R. F.; BELL, R. W.; FROST, K. Risks of boron toxicity in canola and lupin by forms of boron application in acid sands of South-Western Australia. **Journal of Plant Nutrition**, v. 38, n. 6, p. 920-937, 2015.

BROWN, P. H. et al. Boron in plant biology. **Plant Biology**, v. 4, n. 2, p. 205-223, 2002.

BROWN, P. H.; HU, H. Boron mobility and consequent management. **Better Crops**, v. 82, n. 2, p. 28-31, 1998.

CAMARGO, P. N.; SILVA, O. **Manual de Adubação Foliar**. São Paulo: La libreria/Herba, 1975, 258 p.

CAMARGO, O. A.; Reações e Interações de micronutrientes no solo. **Micronutrientes na Agricultura**, Piracicaba, POTAFOS/CNPq, p. 243-272, 1991.

CASAGRANDE, J. C. **O boro em solos no município de Piracicaba**. 1978. 122 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Piracicaba, 1978.

CONG, X.; JING, H.; LIN, N.; XIA, Z.; HUANG, M.; & JIANG, X. (2015). Boron deficiency affects cell morphology and structure of young leaves of radish. **Acta physiologiae plantarum**, 37, 247. doi: 10.1007/s11738-015-2004-7

DANTAS, J. P. Boro. **Micronutrientes na Agricultura**, Piracicaba, POTAFOS/CNPq, p. 113-130, 1991.

DEGRYSE, F. "Boron fertilizers: Use, challenges and the benefit of slow-release sources – a review." **Journal of Boron**, v. 2, n. 3, p. 111-122, 2017.

EMBRAPA. **Soja em números**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 25 nov. 2019.

EMBRAPA. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos** / Ciriaca Arcangela Ferreira de Santana do Carmo ... [et al.]. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41 p. – (Embrapa Solos. Circular Técnica; 6).

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production, **Advances in Agronomy**, v. 77, p. 185-268, 2002.

FAO, OECD. "**OECD–FAO agricultural outlook 2007–2016, Paris**." Indigene Völker und Konflikt Literaturverzeichnis (2007).

FERGUSON, D.; OLSON, R.; HEINBIGNER, C. Compacted muriate of potash fertilizers containing micronutrients and methods of making same. U.S. Patent Application n. 16/361,516, 26 set. 2019.

FOTH, H. D.; ELLIS, B. G. **Soil Fertility**. 2. Ed., Lewis CRC Press LLC, Boca Raton, 1997, 290 p.

GIMENO, V. et al. The physiological and nutritional responses to an excess of boron by Verna lemon trees that were grafted on four contrasting rootstocks. **Trees - Structure and Function**, v. 26, n. 5, p. 1513-1526, 2012.

GOEDERT, W. J. Região dos Cerrados; potencial agrícola e política para seu desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 24, n. 1, p. 1-17, 1989.

GOLDBERG S., FORSTER H., Boron sorption on calcareous soils and reference calcites, **Soil Science**, v. 152, n. 4, p. 304-310, 1991.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H.; HEICK, E. Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals, and soils infer red from ionic strength effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 3, p. 704-708, 1993.

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

GU, B.; LOWE, L. Studies on the adsorption of boron on humic acids. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 305-311, 1990.

GUILHERME, L. R. G.; LOPES, A. S. **Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária**. Boletim Técnico N° 5, 2. Ed., São Paulo: ANDA, p. 62, 1994.

GUPTA, U. C. Relationship of total and hot water soluble boron, and fixation of added boron, to properties of podzol soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 1374-1379, 1968.

;HU, H.; BROWN, P.H., (1997). Absorption of boron by plant roots. **Plant Soil** 193: 49-58. <https://doi.org/10.1023/A:1004255707413>

HU, H.; BROWN, P. H. Localization of Boron in Cell Walls of Squash and Tobacco and Its Association with Pectin (Evidence for a Structural Role of Boron in the Cell Wall). **Plant physiology**, v. 105, n. 2, p. 681-689, 1994.

IERNA, A., PELLEGRINO, A., & MALVUCCIO, A. (2017). Effects of micronutrient fertilization on the overall quality of raw and minimally processed potatoes. **Postharvest biology and technology**, 134, 38-44. doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.08.006

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola. (2016)**. Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/lspa_201604.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201604.pdf). Acesso em: 27 fev. 2019.

KIHARA, J.; SILESHI, G. W.; NZIGUHEBA, G.; KINYUA, M.; ZINGORE, S.; & SOMMER, R.; (2017). Application of secondary nutrients and micronutrients increases crop yields in sub-Saharan Africa. **Agronomy for Sustainable Development**, 37, 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0431-0>

KOT, F. S. et al. On boron turnover in plant–litter–soil system. **Geoderma**, v. 268, p. 139-146, 2016.

- KOZŁECKI, T.; POLOWCZYK, I. Adsorption of Boron by Minerals, Clays, and Soils. **Boron Separation Processes**, p. 147-168, 2015.
- LIMA, D. P. et al. The impact of Chinese imports of soybean on port infrastructure in Brazil: A study based on the concept of the “Bullwhip Effect”. **Journal of Commodity Markets**, v. 9, p. 55-76, 2018.
- LOPES, A. S. Micronutrientes: filosofias de aplicação, fontes, eficiência agrônômica e preparo de fertilizantes. **Micronutrientes na Agricultura**, Piracicaba: POTAFOS/CNPq, p. 357-390, 1991.
- LOPES, A. S. Soils Under Cerrado: A Success Story in Soil Management. **Better Crops International**, v. 10, n. 2, p. 9-15, 1996.
- LOPES, A. S. **Micronutrientes Filosofias de Aplicação e Eficiência Agrônômica**. Associação Nacional para Difusão de Adubos, p. 1-58, 1999.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas aspectos agrônômicos**. Boletim Técnico N° 4, São Paulo: ANDA, 3. Ed., n. 4, p. 70, 2000.
- MALAVOLTA, E.; BOARETTO, A. E.; PAULINO, V. T. Micronutrientes, uma visão geral. **Micronutrientes na Agricultura**, Piracicaba: POTAFOS/CNPq, p. 1-23, 1991.
- MALAVOLTA, E.; KKLIEHMANN, H. J. **Desordens nutricionais nos cerrados**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, p. 136, 1985.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press Inc., 1995. 889p.
- MATTOS, D. et al. Soil boron fertilization: The role of nutrient sources and rootstocks in citrus production. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 7, p. 1609-1616, 2017.
- MCCLUNG, A. C. et al. Cotton Fertilization on Campo Cerrado Soils. IBEC Research Institute, **Bulletin 27**, v. 35 p. 1961.
- MERIÑO-GERGICHEVICH, C. et al. Physiological and nutritional responses in two highbush blueberry cultivars exposed to deficiency and excess of boron. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 2, p. 307-318, 2017.
- MIWA, K.; FUJIWARA, T. Boron transport in plants: co-ordinated regulation of transporters. **Annals of Botany**, v. 105, p. 1103-1108, 2010.
- MORTVEDT, J. J. Availability of boron in various boronated fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 3, p. 433-437, 1968.

MORTVEDT, J. J.; WOODRUFF, J. R. **Technology and application of boron fertilizers for crops**. In 'Boron and its role in crop production'. CRC Press: Boca Raton, FL, p. 158-176, 1993.

NELSON, L. B. **History of the U.S. fertilizer industry**. Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, AL, 1990, 537p.

OCDE/FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. OCDE-FAO. **Perspectivas Agrícolas 2015-2024**. OECD Publishing, Paris. Disponível em: https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-es. Acesso em: 2 Fev. 2019.

OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C.; ZACCHEO, P. V. C. Use of nitrogen fertilizer in corn. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 4, n. 2, p. 226-244, 2011.

OLIVEIRA, L. A.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R. A. C. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 199-206, 2018.

OLSON, R. V.; BERGER, K. C. Boron fixation as influenced by pH, organic matter and other factors. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 11, p. 216-220, 1946.

OZTURK, M. et al. Boron and Plants. **Plant Adaptation and Phytoremediation**, p. 275-311, 2010

ÖZKUL, C. et al. Boron as an exploration tool for terrestrial borate deposits: A soil geochemical study in Neogene Emet-Hisarçık basin where the world largest borate deposits occur (Kütahya-western Turkey). **Journal of Geochemical Exploration**, v. 173, p. 31-51, 2017.

PRINCI, M. P. et al. Boron Toxicity and Tolerance in Plants. **Plant Metal Interaction**, p. 115-147, 2016.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle: an update. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 11, n. 1, p. 1-38, 2015.

Research and Markets. (2017). Global specialty fertilizers market analysis & trends – Industry forecast to 2025, 185 pp.

RUY, V. M. **Contribuição para o estudo do boro disponível em solos**. 1986. 104p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1986.

SALEEM, M. et al. Importance of Boron for Agriculture Productivity: A Review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 1, n. 8, p. 132-140, 2011.

SANTOS, G. A., KORNDORFER, G. H., PEREIRA, H. S., & PAYE, W. (2018). Addition of micronutrients to NPK formulation and initial development of maize plants. **Bioscience Journal**, 34(4), 927–936. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n1a2018-36690>

SHORROCKS, V. The occurrence and correction of boron deficiency. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1, p. 121-148, 1997.

SILLANPÄÄ, M. (1982) **Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study**. Food and agriculture organization of the United Nations. FAO Soil Bulletin 48. Rome

SILVA, R. C. Slow and Fast-Release Boron Sources in Potash Fertilizers: Spatial Variability, Nutrient Dissolution and Plant Uptake. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 6, p. 1437-1448, 2018.

SINGH, P.; DWIVEDI, P. Micronutrients zinc and boron enhance stevioside content in *Stevia rebaudiana* plants while maintaining genetic fidelity. **Industrial Crops & Products**, v. 140, 2019.

SOUSA, D. M. G. **Calagem e adubação da soja no cerrado**. Porto Alegre, DEAGRO/ADUBOS TREVO S/A, p. 17. 1989.

STEWART, W. et al. The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 1, p. 1-6, 2005.

TOLLEFSON, J. The Global Farm. **Nature**, v. 466, p. 554-556, 2010.

USDA. **USDA foreign agricultural service**. 2019. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/regions/brazil>. Acesso em: 24 Nov. 2019.

VANDERLEY, J. C. **Boro em materiais de três solos do município de Lavras, Estado de Minas Gerais**. 1984, 96p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1984.

WILLET, W., ROCKSTRÖM, J., LOKEN, B., SPRINGMANN, M., Lang, T., VERMEULEN, S., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. **Lancet**, 393, 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

ZHANG, Y. et al. Soil application of boron and zinc influence fruit yield and quality of Satsuma Mandarin in acidic soils. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 1, p. 1-8, 2015.

KIHARA, J.; SILESHI, G. W.; NZIGUHEBA, G.; KINYUA, M.; ZINGORE, S.; & SOMMER, R.; (2017). Application of secondary nutrients and micronutrients increases crop yields in sub-Saharan Africa. **Agronomy for Sustainable Development**, 37, 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0431-0>

1 **SEGUNDA PARTE – ARTIGO**

2 **Core Ideas:** Muriate of Potash (MOP) compacted with different water-solubilities B sources.
3 Different solubilities of B sources in the same fertilizer may reduce risks of leaching. Carrying
4 B along with a macronutrient can help distribution issues.

5 **Residual Effect and Agronomic Efficiency of a Novel Source of Boron for Tropical Soils**

6 **(Manuscrito será submetido para a revista Soil Science Society of America Journal,**
7 **sendo elaborado com as normas do periódico)***

8 Éder Lucas Corrêa dos Santos¹, Luiz Roberto Guimarães Guilherme¹

9 ¹ Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais,
10 37200-900, Brazil

11 **ABSTRACT**

12 Boron (B) deficiency is a limiting factor in many croplands worldwide. However, it is very
13 challenging to evenly deliver the low recommended rates over large areas, especially with the
14 narrow window between deficiency and toxicity in plants. This study evaluated the residual
15 effect and the agronomic efficiency of a novel B source for two crops (soybean and corn) on a
16 Cerrado soil under glasshouse and field conditions. Boron sources included a novel fertilizer
17 in its old formulation as fast-release B source (sodium borate) and a new formulation as a fast-
18 and slow-release B source (sodium borate and colemanite) for season-long B availability. The
19 new B source provided a reduction of B leaching, compared with the old formulation. For
20 soybean, there was no statistical difference among the different B sources on the average
21 number of seeds and number of seeds per pod, as well as on grain yield for soybean, but the
22 new fertilizer formulation presented a higher uptake efficiency than the old formulation, under

23 glasshouse conditions. The second crop showed higher stalk B contents for the lower solubility
24 sources. Under field conditions, the different sources of B showed no difference in dry matter
25 and yield levels in the flowering stage, although less soluble sources of B provided a greater B
26 content in the pods. The second crop was affected by frost, yet there was no statistical
27 difference in total shoot uptake and dry matter weight. The different B sources had no residual
28 effect on the tested field conditions.

29 **Keywords:** Leaching. Micronutrient. Slow Release Fertilizer. Solubilization.

30

INTRODUCTION

31 The use of fertilizers in agriculture is closely linked to the sustainability of food production
32 systems. Much of the nutrients are not available to plants and are lost. That amount of nutrients
33 that are lost might exceed the limits accepted as safe and sustainable (BINDRABAN et al.,
34 2020).

35 In addition, the fact that farmers might not be using micronutrients in soil fertilization is
36 also a problem. Most of the fertilizer market, between 90 and 95%, is composed of concentrated
37 NPK sources (RESEARCH & MARKETS, 2017). A long time in a row using only these
38 formulations have reduced natural micronutrient stocks in much of the planet's soils
39 (BINDRABAN et al., 2020). It is essential that micronutrients are used in agriculture, since
40 crops with well-nourished macro and micronutrients in a balanced way are more resistant to
41 environmental stress (BINDRABAN et al., 2020), and also have improved yield, as well as the
42 quality of the product (IERNA et al., 2017). An example of micronutrient with a vital role in
43 agriculture is boron (B). Along with zinc (Zn), B is the micronutrient that is most deficient in
44 soils of agricultural importance (SILLANPÄÄ, 1982).

45 Brazil is one of the world leaders in food production and agricultural goods (OCDE/FAO,
46 2015), being considered a global farm (TOLLEFSON, 2010). One of this country's agricultural

47 belts is the Brazilian Cerrado Region. However, it is estimated that 60% of this region presents
48 low B contents on soils (LOPES & GUILHERME, 2016). One of this region's most important
49 production systems is the soybean cultivation, followed by corn as a second crop (FREDDI et
50 al. 2017). Given the importance of these cultures and the Cerrado Region to Brazilian
51 agriculture, it is important to research better ways to fertilise this region's soil and provide
52 better nourishment to plants, in order to increase quality and yield.

53 The EAT-Lancet Commission on Food, Planet and Health establishes that agricultural
54 intensification in a sustainable way, as well as the adoption of good practices for the soil, so
55 that there is an improvement in the efficiency of nutrients (WILLETT et al., 2019). The
56 efficiency of nutrient fertilization is still low, even today, with a world average of 40%
57 (BOUWMAN et al., 2017). Strategies to increase the efficiency of production systems are
58 necessary, and chemical fertilizers are essential to achieve this objective (BINDRABAN et al.,
59 2020). Bindraban et al. (2015) advocate for a standard change of recommendation and supply
60 of fertilizers for plants, taking as a starting point a better understanding of the physiological
61 processes of plants, instead of taking chemistry first into consideration. Adjusting the
62 nutritional needs of plants in the prevailing soil, climate, and cultivation conditions using
63 fertilizers can bring multiple advantages to human and ecological health (BINDRABAN et al.,
64 2018). Fertilizer interventions must meet the specific soil cultivation conditions of the site to
65 achieve more significant effectiveness (KIHARA et al., 2017).

66 In order to improve the nutrient use efficiency, there is a guideline to increase the utilization
67 of fertilizers, named by 4R stewardship (JHONSTON & BRUULSEMA, 2014). Each R
68 corresponds to a different fertilizer management: right time, right rate, right source and right
69 place.

70 Innovations in fertilizers and application technologies can also prevent an eventual
71 overdose of micronutrients, through different strategies, such as the coating of NPK fertilizers
72 with micronutrients (SANTOS et al., 2018), instead of bulk mixing.

73 Another strategy that can be used in the manufacture of fertilizers with various nutrients is
74 compaction. This method can result in a new product without compromising handling and
75 storage characteristics (U.S. Patent No. 9.266,784 B2, 2016).

76 Given the above, the present study aims to test a new fertilizer, with sources of different
77 solubilities of B incorporated into KCl. It is theorized that KCl is a suitable macronutrient to
78 carry B, due to its use on a global scale and chemical stability (SILVA, 2018).

79 **MATERIALS AND METHODS**

80 **Soil**

81 For the glasshouse trial, the soil was collected in Uberaba (State of Minas Gerais, Brazil),
82 at the same spot that was used to conduct the field trial. It is classified as an Oxisol, or as a
83 Dystrophic Red Latosol (EMBRAPA, 2018). Its chemical and physical characteristics are
84 given in Table 1. For the glasshouse trial, this soil was collected from the top layer (0-0.2 m),
85 then air-dried, sieved to <2 mm and analyzed before use. Given the low extractable B
86 concentrations (<0.3 mg B dm⁻³) on this soil, it can be considered as B-deficient for most crops
87 (SIMS & JOHNSON, 1991).

88

89 **Table 1: Soil chemical and physical characteristics.**

| pH | K [‡] | P [‡] | Ca [†] | Mg [†] | Al [†] | H+Al | SB | t | T | V | m | OM |
|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------|------|------|-------|------|------|
| (water) | mg dm ⁻³ | | | | | | | | | % | | |
| 5.8 | 72.5 | 27.01 | 1.55 | 0.45 | 0.03 | 2.01 | 2.19 | 2.22 | 4.2 | 52.05 | 2.67 | 1.19 |
| P-Rem | Zn [‡] | Fe [‡] | Mn [‡] | Cu [‡] | B [§] | S [#] | Clay | Silt | Sand | | | |
| mg L ⁻¹ | mg dm ⁻³ | | | | | | % | | | | | |
| 47.55 | 4.07 | 50.98 | 8.35 | 0.46 | 0.07 | 10.7 | 17 | 1 | 82 | | | |

90 * Solution/solid ratio: 2.5/1; ‡Mehlich 1; †KCl – 1 mol L⁻¹; §Hot Water; #Acetic mono
 91 ammonium acetate

92

93

Fertilizers and Plant Material

94 Six different fertilization strategies were used as treatments, listed at table 2: 1) Control;
 95 2) only MOP; 3) Old Formulation of B fertilizer; 4) New Formulation of B Fertilizer; 5) MOP
 96 compacted along with Colemanite; and 6) a bulk blended MOP and Ulexite mix.

97 For both (glasshouse and field) trials, soybean (*Glycine max*) cultivar BRS6970ipro
 98 was used as the first crop, and corn (*Zea mays*) cultivar 30A91 as the second, to test the
 99 fertilizers residual effect on soil.

100

101 **Table 2: Treatments fertilizer characteristics.**

| Treatment | B Source | B Content (g kg ⁻¹) | B dose - glasshouse trial (mg . dm ⁻³) | B dose - field trial (kg . ha ⁻¹) |
|-------------------------------|--|------------------------------------|--|--|
| Control | - | - | - | - |
| MOP | - | - | - | - |
| Old Fertilizer Formulation | Sodium borate, co-compacted | 5 | 0.81 | 0.8 |
| New Fertilizer Formulation | Sodium borate and colemanite, co-compacted | 5 | 0.81 | 0.8 |
| MOP + Colemanite | Colemanite, co- compacted | 5.7 | 0.81 | 0.8 |
| MOP + Ulexite | Ulexite, bulk- blended | 5 | 0.81 | 0.8 |

102

103 **Glasshouse Trial**

104 The glasshouse trial was conducted at the Soil Science Department, Federal University
105 of Lavras, Brazil (21°13'33.3"S, 44°58'43.4" W), using a completely randomized design, with
106 six treatments and four replicates.

107 A soil leaching columns system was set to perform a leaching experiment before sowing
108 of the crops. The leaching system consisted of polychloroethene pipes (250 mm height by 150
109 mm diameter) and caps (150 mm diameter). The base of the columns was covered with a layer
110 of cotton involved with a 150 µm mesh, (to prevent the solid particles go through the flow and
111 blocking the tubes), a hose adapter (12,7 mm diameter), and a hose to carry the leaches to a
112 polyethylene terephthalate bottle, used as liquid collector. Those columns were filled with 3,36
113 dm³ of soil. This soil was watered to field capacity, and then the treatments were applied.

114 The fertilizers were applied at a depth of 3 cm and then covered with the soil, leaving a
115 72-hours period for fertilizers to react. Then the soils were leached by slowly passing four total

116 pore volumes of deionized water in 8 times (0.5 total pore volume each). The soil total pore
117 volume (TPV) was calculated according to TEIXEIRA et al. (2017). In this case, each 0.5 pore
118 volume corresponds to approximately 45-mm pluviosity. Each 0.5 TPV of water forced
119 leaching was collected, the volume recorded, and then a 50-mL sub-sample was kept to
120 determine the B concentrations in an ICP-OES (Spectro, model: Blue). Next, the basal nutrient
121 solution (without B and K for the first crop, and B for the second one) was applied on leaching
122 columns soil, and the crop seeds placed 2-4 cm below the surface. The pots were watered daily
123 to 70% of field capacity, avoiding any leaching. After the soybean harvest, corn was sowed for
124 the second crop, at the same pots where the first crop was conducted. The harvest was made at
125 the maturity stage for soybean and silking stage (R1) for corn, then dried, weighed, ground and
126 digested for nutrient analysis following Malavolta's methodology (MALAVOLTA,1997). The
127 boron harvest index was computed following the formula of Dass et al. (2010). It was used for
128 soybean crop since the corn has not reached the production stage.

129 A soil sample of each experimental unity was collected after harvesting the second crop
130 for performing soil fertility analyses - including B content -, following Embrapa's methods
131 (EMBRAPA, 2017).

132 **Field Trial**

133 The field trial was conducted in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil, at the 19°39'13.4"S
134 47°58'09.0"W coordinates and followed a randomized block design, with the six treatments
135 already listed and five replicates.

136 The basal fertilization followed the local recommendation (SOUSA & LOBATO, 2004),
137 with 0.8 kg ha⁻¹ of boron, and the agronomic practices followed the local farming standards.

138 At the flowering stage of each crop (R2 for soybean; and R1 for corn), three plant samples
139 at each experimental unity were collected for tissue analyses, following Malavolta's

140 methodology (MALAVOLTA, 1997). At the maturity stage, ten soybean plants were collected
141 to analyze seeds and pods number, as well as the number of seeds per pod, pod dry weight, 100
142 seed weight, plant height, grain yield, and nutrient analysis according to Malavolta's
143 methodology (MALAVOLTA, 1997).

144 The second crop fertilization also followed the local recommendation (SOUSA &
145 LOBATO, 2004) for all nutrients, except B. The corn plants grow up to the silking stage (R1),
146 when an atypical frost reached the field, leading them not to complete their life cycle.
147 Immediately after the frosting event, corn plants were harvested, dried, weighed, ground, and
148 digested for nutrient analysis.

149 After the second crop harvesting, five sub-samples of soil were collected at each
150 experimental unity at the depths of 0-0.2 m and 0.2-0.4 m, to make a composite soil sample for
151 analyses. These samples were analyzed for soil fertility attributes, including their B content,
152 following Embrapa's instructions (EMBRAPA, 2017).

153 **Statistical analysis**

154 Analysis of variance (ANOVA) was performed to verify the effect of the treatments for
155 all collected data. Such analyses comprised the EDS test to identify outliers and then a Tukey
156 test to compare the average values for each treatment, with the Speed Stat software
157 (CARVALHO & MENDES, 2017).

158 **RESULTS AND DISCUSSION**

159 **Glasshouse Trial**

160 **B Leaching**

161 The leaching results are shown in Table 3. The old formulation presented the highest
162 percentage of B leaching value, representing more than 81% of the soil total B, whereas the

163 new formulation showed a smaller total leaching (~69%), implying that the new formulation
 164 has a higher proportion of low solubility B sources on its composition. The old formulation
 165 had approximately 75% of B leached after 2 PVs. The MOP + Ulexite had a B release slower
 166 than the new formulation until 3 PVs. After this, its B leaching surpassed that of the new
 167 formulation. MOP + Colemanite presented the lower B Leaching values (15.78%), thanks to
 168 its low water solubility. The new formulation and the treatment consisting of MOP + Ulexite
 169 did not differ statistically. Conversely, the MOP + Colemanite treatment provided a slow and
 170 constant release of B, which is supported by results reported elsewhere (BROSCHAT, 2008).

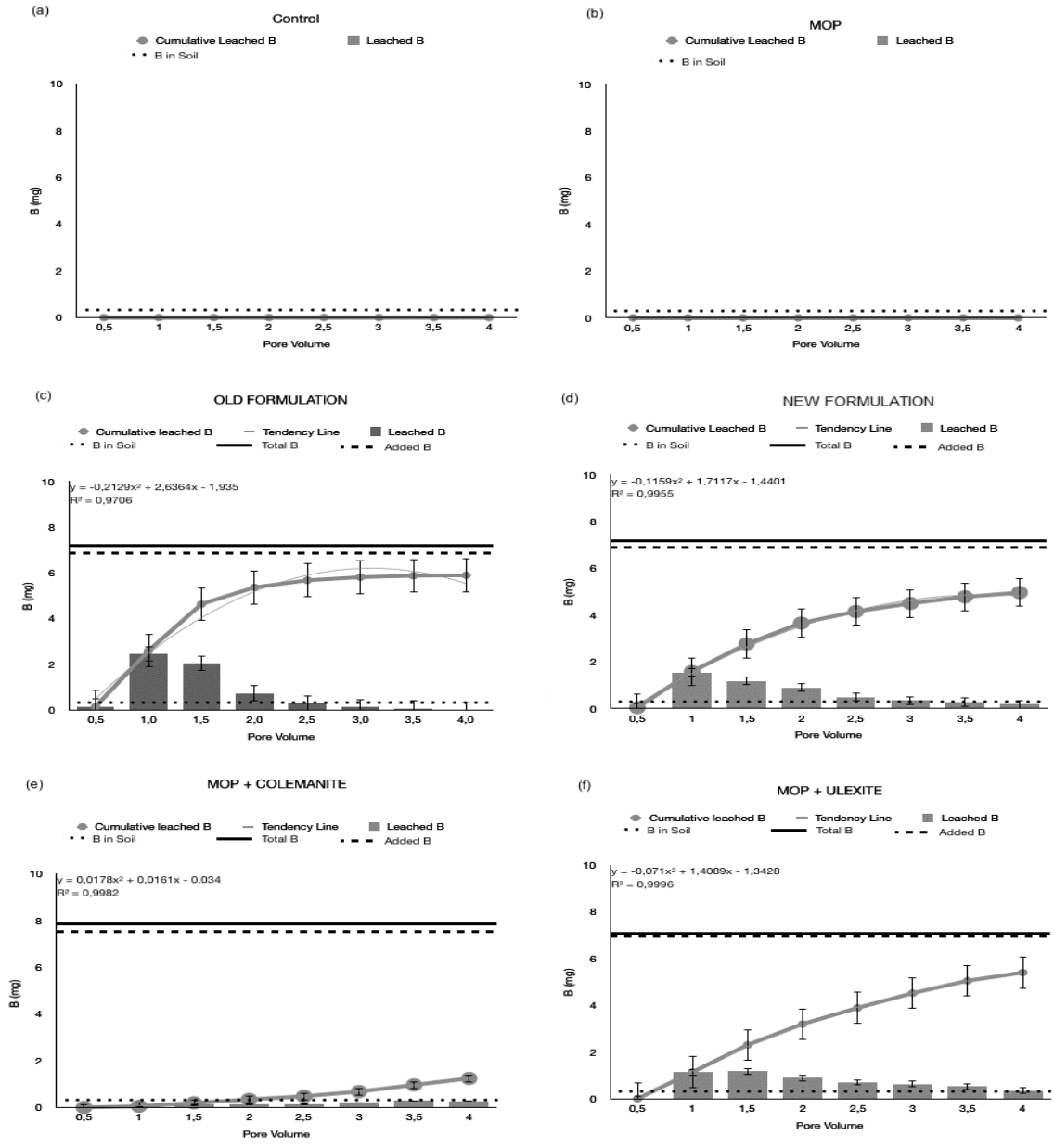
171 **Table 3: Percentage of Total B Leached after each water application**

| Treatments | 0.5 PV* | 1 PV | 1.5 PV | 2 PV | 2.5 PV | 3 PV | 3.5 PV | 4 PV |
|------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | % of Total B Leached | | | | | | | |
| Old Formulation | 1.15 a | 35.99 a | 64.33 a | 74.46 a | 78.78 a | 80.68 a | 81.57 a | 81.83 a |
| New Formulation | 0.57 a | 28.42 b | 38.36 b | 50.8 b | 57.63 b | 62.44 b | 66.35 b | 68.88 b |
| MOP + Colemanite | 0.00 a | 0.64 c | 2.49 c | 4.33 c | 6.05 c | 8.63 c | 12.22 c | 15.78 c |
| MOP + Ulexite | 0.00 a | 15.68 b | 31.68 b | 43.96 b | 53.52 b | 62.18 b | 69.5 b | 74.38 ab |

172 †Values followed by the same letter (within columns) do not differ by Tukey-HSD test
 173 at 0.05-probability level; *PV: Pore Volume. Each pore volume unity corresponds to an
 174 approximately 90.54 mm (L m⁻²) pluviosity, in this case.

175 The New B Formulation showed a fast pattern of B release at the beginning, which slowed
 176 down after approximately 2.5 PVs. Such pattern suggests a release of the high solubility B
 177 compounds initially, and then a subsequent low solubility B sources release. That condition
 178 can be useful, affording better tailoring between plant needs and the nutrient release from the
 179 fertilizer, as the B requirement for the seedling growth through the flowering stages (BELL,
 180 1997). Figure 1 shows the different leaching patterns of the B sources evaluated.

181 Figure 1: Total B Leaching of (a) control, (b) MOP, (c) Old Formulation, (c) New B source
 182 formulation, (e) MOP + Colemanite and (f) MOP + Ulexite in glasshouse leaching test trail.
 183 Each pore volume unity corresponds to a 90.54 mm (l . m⁻²) pluviosity, in this case



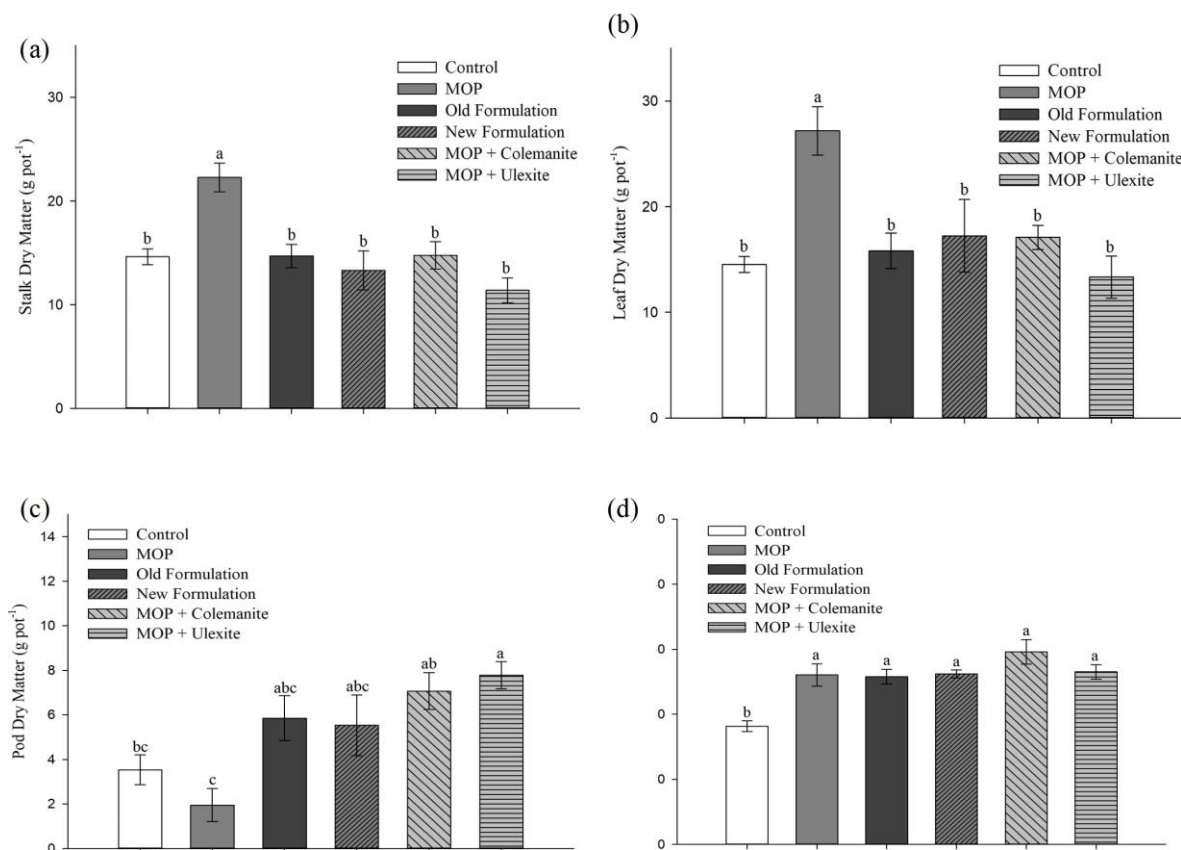
184

185

186 First Crop

187 Dry matter results are show in figure 2. MOP Treatment showed a higher dry matter of stalk
188 (22.29 g) and leaf (27.19 g), compared with the others. On the other hand, this treatment had
189 the lowest pod dry matter (1.95 g). MOP + Ulexite had the bigger pod dry matter (7.78 g), still
190 not statistically different from MOP + Colemanite (7.07 g), Old Formulation (5.85 g), and New
191 Formulation (5.53 g). Control treatment had the lowest value for total shoot dry matter, while
192 the other treatments had higher values. It suggests the B sources tested had the same efficacy
193 for pod formation and growth, as well as comparable efficiency in providing B - a nutrient with
194 an essential role in plant reproduction (DELL et al. 2002). The treatment without K (control)
195 had a lower total shoot dry matter, while the other treatments showed higher values for this. It
196 suggests the tested B sources had the same efficiency to afford weight to the plants as the
197 without B treatment.

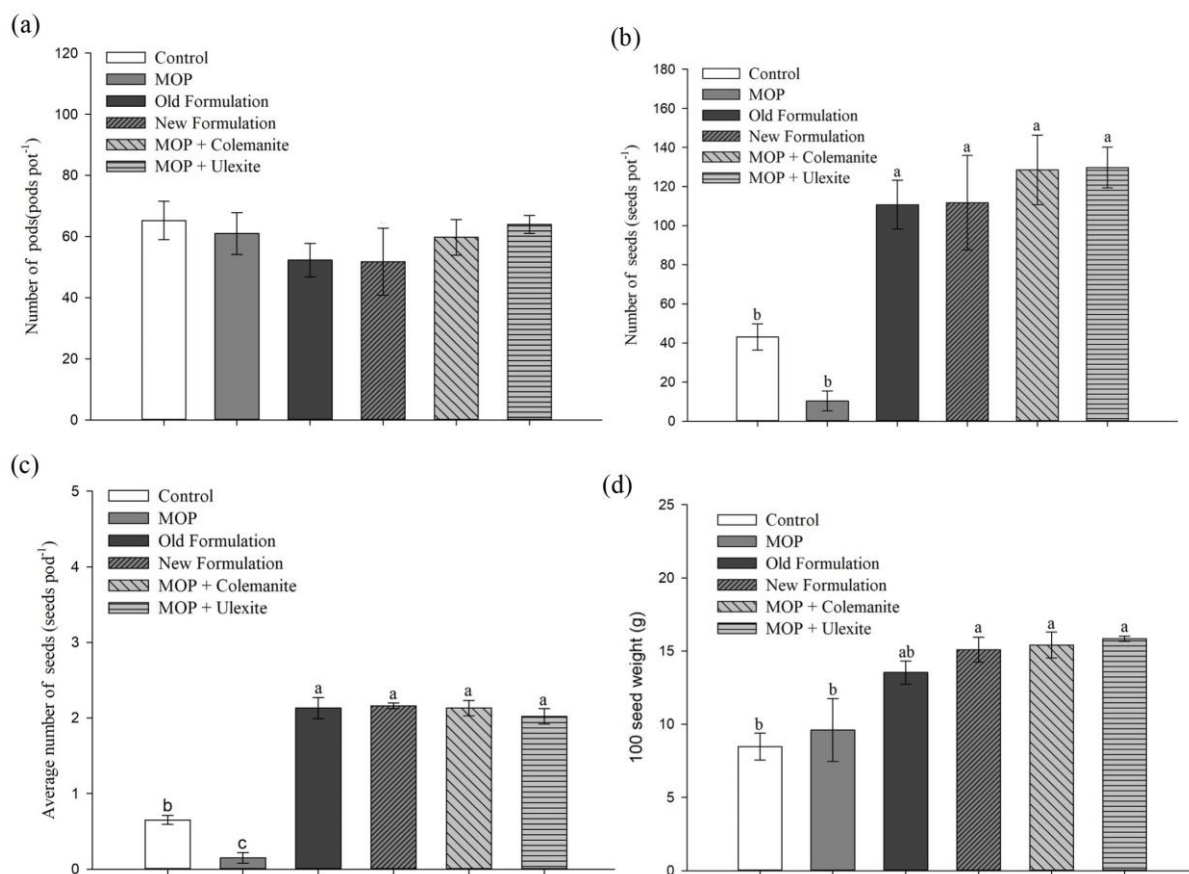
198 Figure 2: Dry matter of (a) stalk, (b) leaves, (c) pods and (d) total shoot, in g, for first crop in
 199 glasshouse trial. Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD test at 0.05
 200 probability level.



201

202 Figure 3 shows production parameters of the first crop. Treatments with no B supply
 203 (Control and MOP) presented lower 100 seed weight, seed number, and number of seeds per
 204 pod, comparing with B supply treatments. Treatments with B had no statistical difference in
 205 grain yield, suggesting that the new formulation is as effective as the other B sources for the
 206 first crop production. For 100 seed weight, the New Formulation, MOP + Colemanite, and
 207 MOP + Ulexite showed higher values than Control and MOP. The Old formulation did not
 208 differ from both groups. Pod number had no difference among treatments. As boron can affect
 209 the pollen germination and pollen tube growth (WANG et al., 2003), it can be inferred that the
 210 lack of boron affected the yield production, the number of seeds per pod, and 100 seed weight,
 211 but the different boron sources had no difference for these production characteristics.

212 Figure 3: Number of (a) pods, (b) seeds per pod, (c) average seeds and (d) 100 seed weight of
 213 soybean as first crop in glasshouse trial. Values followed by the same letter do not differ by
 214 Tukey-HSD test at 0.05 probability level.



215

216 The treatments showed no difference for stalk B content (figure 4), yet B application
 217 resulted on a higher B content value in the soybean leaves, with the New Formulation, MOP +
 218 Colemanite, and MOP + Ulexite ensuing the most significant values than Control and MOP. B
 219 application was effective to generate a higher B content on soybean leaves, but the different
 220 sources had the same effectiveness, showing no difference among them. Control, Old
 221 Formulation, and MOP + Ulexite had lower B content values, while MOP + Colemanite had
 222 higher contents in pods.

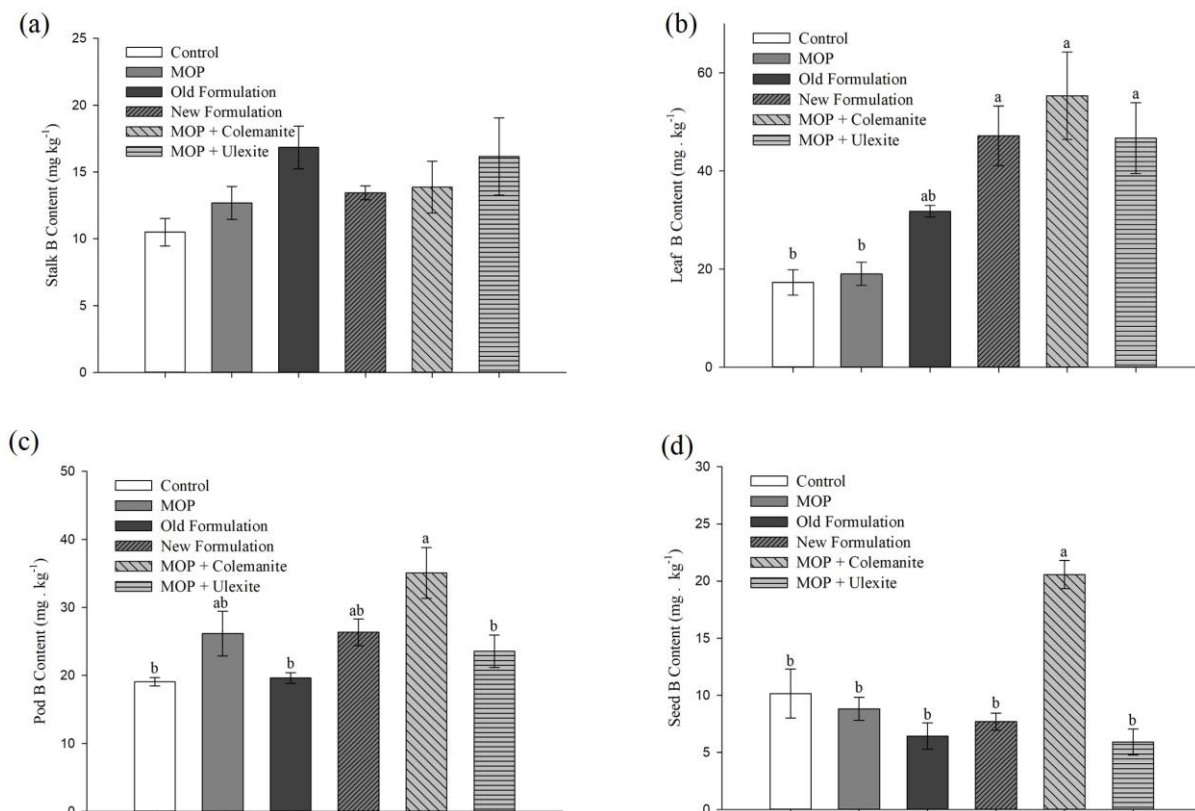
223 For seed B content, the MOP + Colemanite treatment, which displayed the lowest leached
 224 B amount, showed a greater content than the other treatments. As the lowest water solubility

225 and the less leached B source tested, it suggests that the Colemanite treatment had a bigger B
226 content on soil for longer period to afford plants to grow. This could contribute to the B content
227 on seeds, one of the last parts to be formed in the plant (MUNCHOW, 1985), since boron has
228 no mobility inside the plant (TAIZ & ZEIGER, 2017).

229 The treatments showed also no difference for stalk B content. B application caused a higher
230 B content value in the soybean leaves, with the New Formulation, MOP + Colemanite, and
231 MOP + Ulexite producing the most significant values than Control and MOP. B application
232 was effective to generate a higher B content on soybean leaves, but the different sources had
233 the same effectiveness, showing no difference among them. Control, Old Formulation, and
234 MOP + Ulexite had lower B content values, while MOP + Colemanite had higher contents in
235 pods.

236

237 Figure 4: (a) Stalk, (b) leaf, (c) Pod and (d) seed B content for soybean as a first crop in
 238 glasshouse trial. Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD test at 0.05
 239 probability level.



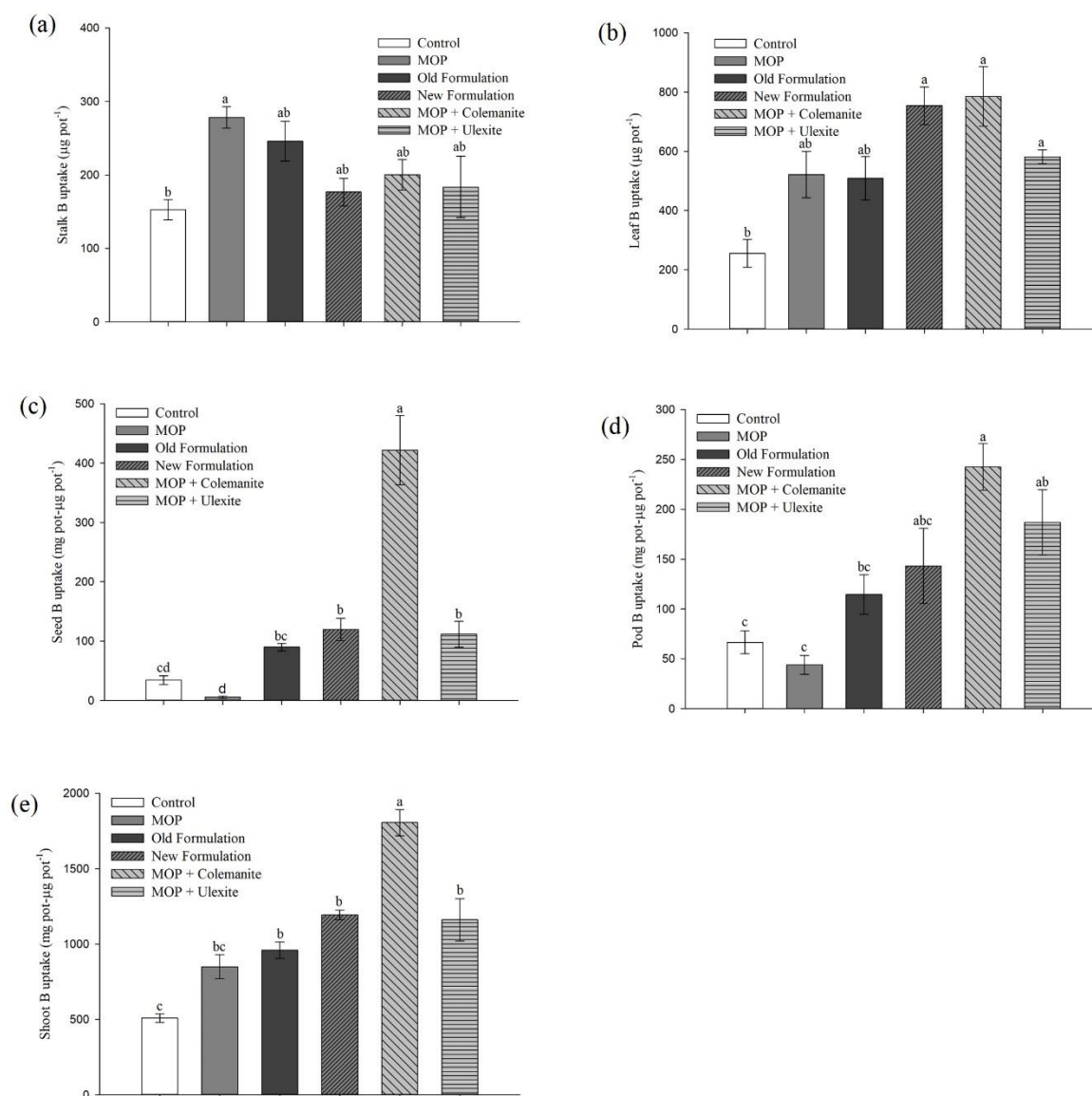
240

241 Figure 5 shows the results of B accumulation for the first crop. MOP showed more
 242 prominent B accumulation (278.19 μg) in the stalk than the Control (152.43 μg); other
 243 treatments had in-between values. This may be due to the small amount of B absorbed in these
 244 plants by what was in the soil, which was only sufficient to be translocated up to the stems.
 245 However, treatments with B showed higher levels in leaves and pods because the higher content
 246 of B available to plants meant that it could be translocated to the leaves and next to the
 247 reproductive organs, thus not remaining on the stems, as seen in the treatments. These
 248 treatments resulted in lower B leaching, leaving a larger amount of B on soil for plants. It could
 249 help plants to develop and absorb a more massive amount of B form the soil, helping to have
 250 a more significant B Uptake. MOP + Colemanite had a more substantial B accumulation in its

251 seeds and total shoot B accumulation. The lower B leaching reported for the Colemanite
252 treatment could explain it, which helped to afford B for seeds and plants. The new formulation
253 had similar values as the Old Formulation and MOP + Ulexite. It implies that the lower-
254 solubility B sources provided the biggest B total uptake for plants, providing a larger available
255 B amount for a longer time. The new source formulation treatment had statistically equivalent
256 values as MOP + Ulexite and the Old Formulation, showing they had the same efficiency for
257 this attribute. These values suggest that the different B sources resulted in differential release
258 effect, according to their solubility.

259

260 Figure 5: B Uptake in (a) stalk, (b) leaf, (c) seed, (d) pod and (e) total for soybean as first
 261 crop glasshouse trial. Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD test at
 262 0.05 probability level.



263

264 Figure 6 shows the results for B harvest index, showing the percentage of boron uptake

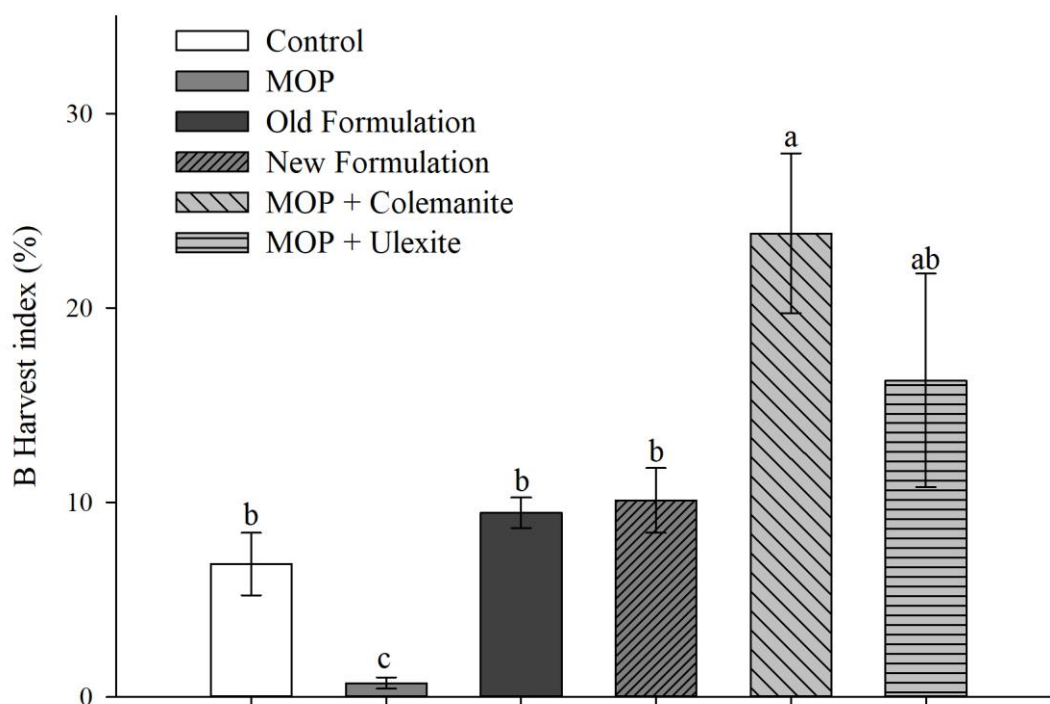
265 on grains, in relation to total B shoot uptake, for the different B sources. MOP + colemanite

266 treatment had the higher level of B uptake in grains, with a value of approximately 23.84%.

267 Both new and old B fertilizer formulation, and control treatment had no statistical difference

268 among its values.

269 Figure 6: Total shoot B harvest index for the different B sources for soybean as a first crop in
 270 glasshouse trial. Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD test at 0.05
 271 probability level.



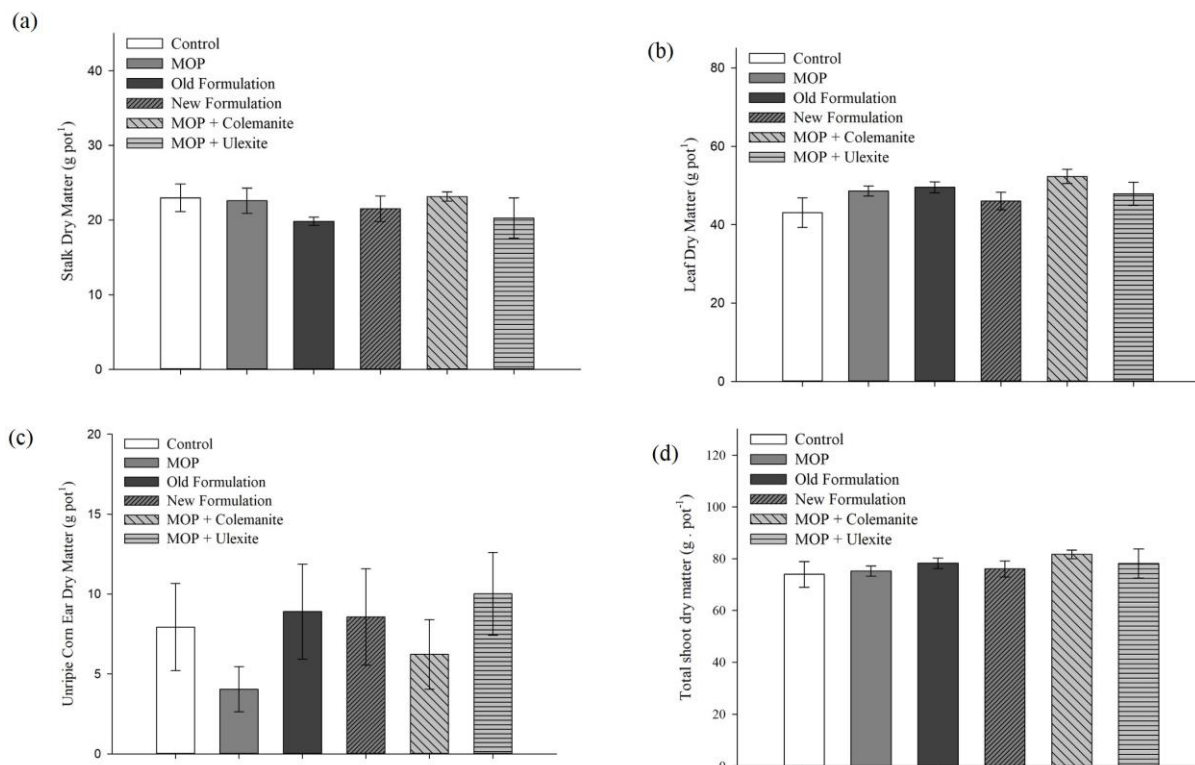
272

273

274 Second Crop

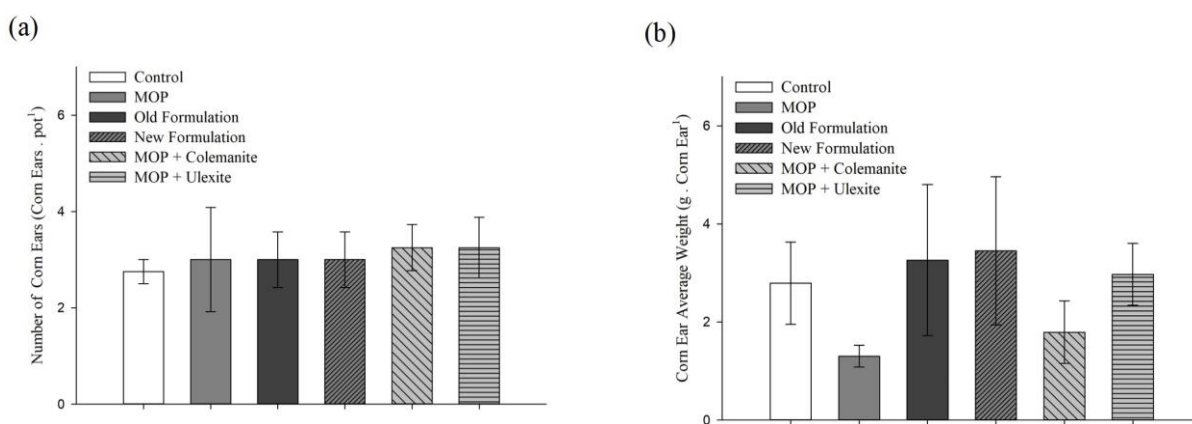
275 All treatments had similar effectiveness with respect to stalk, leaves, unripe corn ears
 276 and total shoot dry matter (figure 7), as well as the number and average weight of corn ears
 277 (Figure 8). This suggests the different B sources resulted in no difference in production
 278 compounds for the second crop, indicating that the residual effect of the treatments was similar
 279 in terms of growing and production rates for plants. It can suggest that the different B rates left
 280 on soil after the leaching were used for the first crop, leaving no sufficient residual B for the
 281 second crop to afford different production compounds to the corn plants.

282 Figure 7: (a) Stalk, (b) leaves, (c) unripe corn ears and (d) total shoot dry matter for corn as a
 283 second crop in glasshouse trial.



284

285 Figure 8: (a) Number of corn ears and (b) corn ears average weight for corn as a second crop
 286 in glasshouse trial.

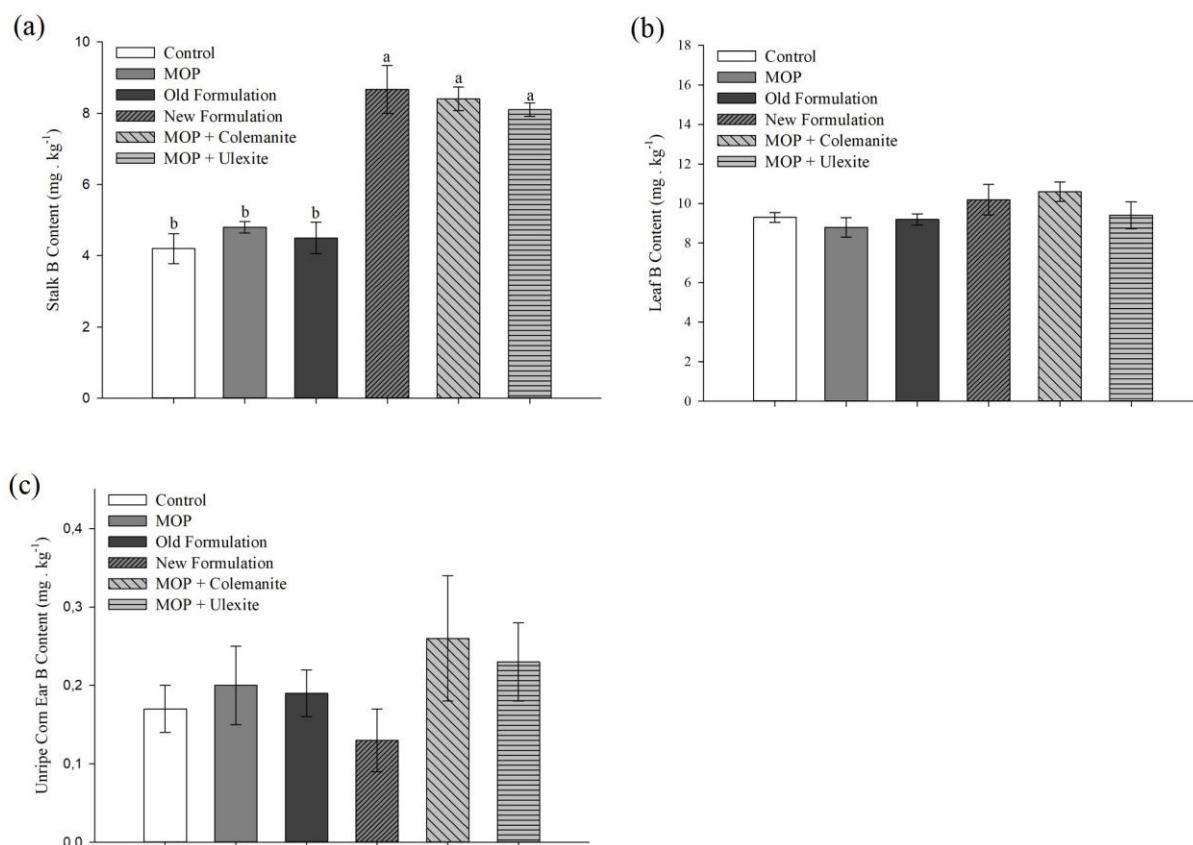


287

288 Even though not resulting in different productivity compounds, the New Formulation,
 289 MOP + Colemanite, and MOP + Ulexite treatments allowed the corn to have a higher
 290 concentration of B in the stem (Figure 9). The treatments showed no difference regarding the

291 levels of B in leaf and corn ears. This implies that the lower-solubility B sources had enough
 292 residual effect to affect the stalk B contents, but not the other tissues that develop posteriorly.

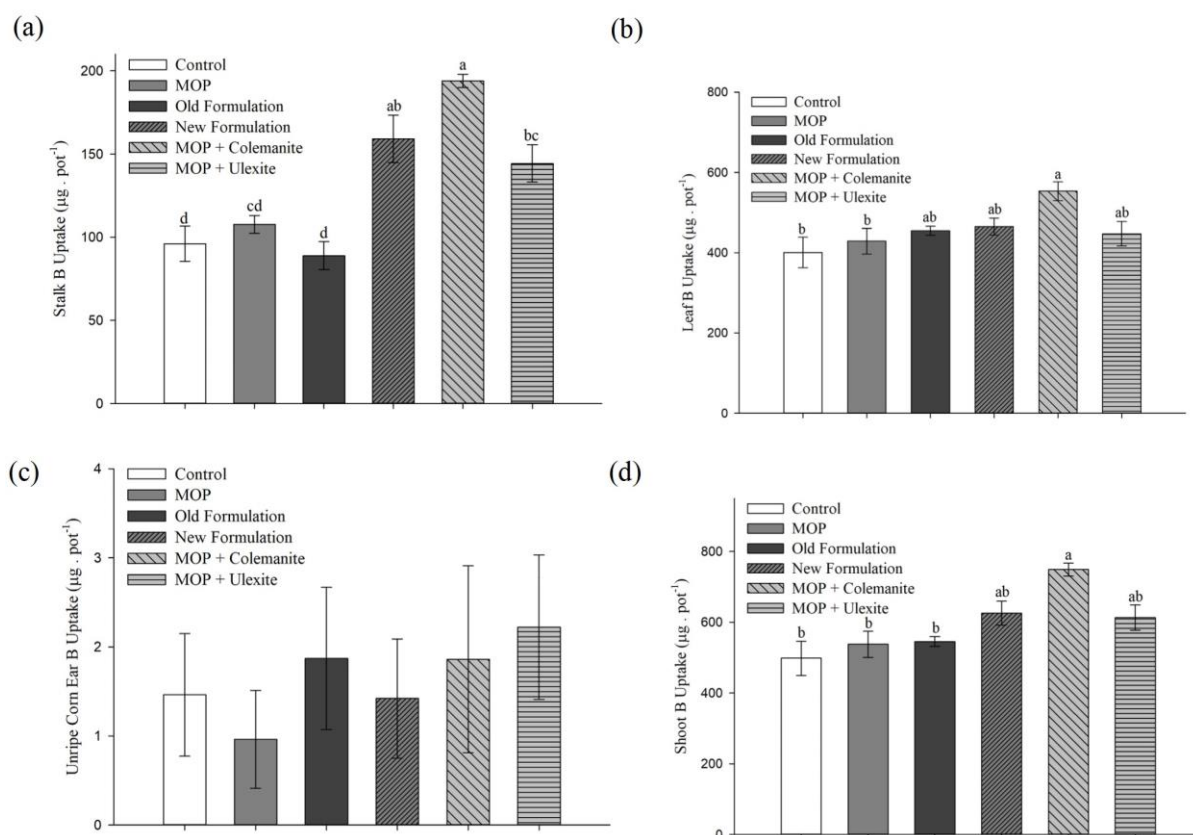
293 Figure 9: B content for (a) stalk, (b) leaf and (c) corn ears for corn as a second crop in
 294 glasshouse trial. Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD test at 0.05
 295 probability level.



296

297 Total shoot B uptake is shown in figure 10. MOP + Colemanite showed a higher total
 298 shoot B accumulation, whereas the Old Formulation, MOP, and Control showed lower values
 299 for this attribute. The New formulation and MOP + Ulexite had in-between amounts. Such
 300 results show that MOP + Colemanite had a higher residual effect for the second crop, followed
 301 by MOP + Ulexite and the New Formulation. On the other hand, Control, MOP and Old
 302 Formulation had a lower residual effect.

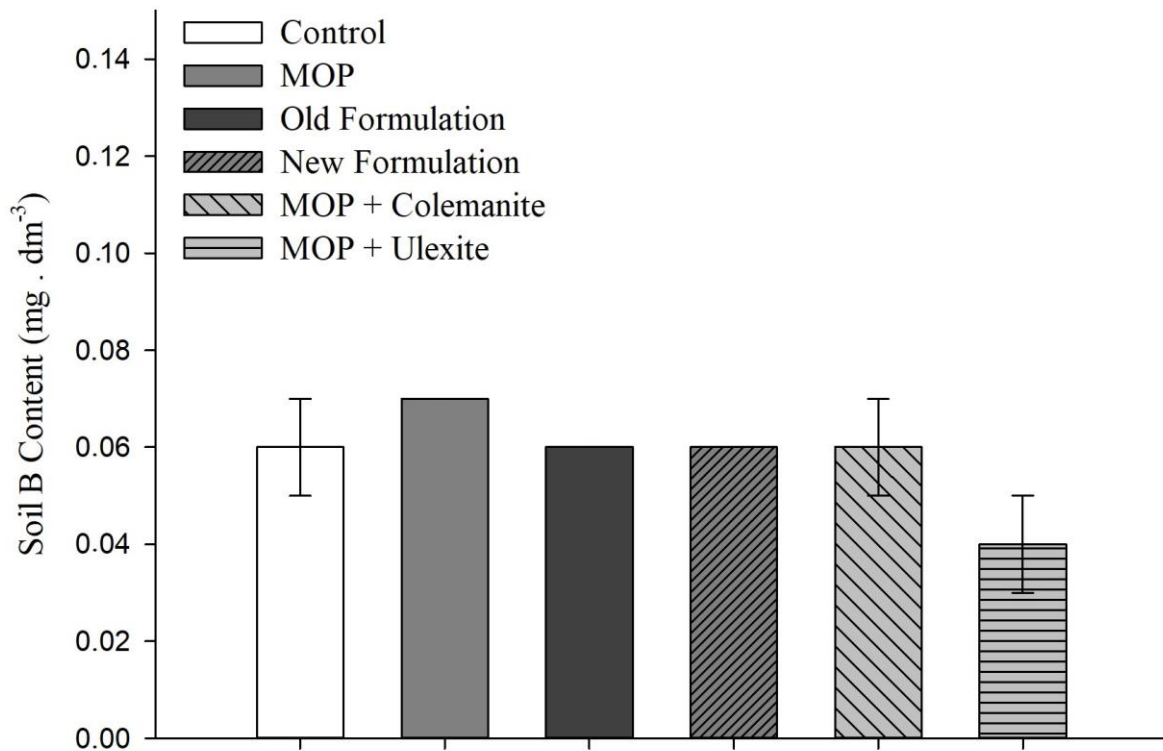
303 Figure 10: B uptake for (a) stalk, (b) leaf, (c) corn ears and (d) total shoot for corn as a second
 304 crop in glasshouse trial. Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD test at
 305 0.05 probability level.



306

307 The soil B content after harvesting the second crop showed no statistical difference
 308 among the sources. The values (Fig. 11) found are considered low or very low for most
 309 cultivated crops (ALVAREZ et al., 1999; SOUSA & LOBATO, 2004), reaching values close
 310 to the initial B soil content. This suggests that boron from all applied B sources that remained
 311 in the soil (after leaching) were absorbed by the two cultivated crops. These results imply that
 312 an eventual third crop would have no sufficient B on soil for its development, which could
 313 condition a B nutritional issue.

314 Figure 11: Soil B content after the second crop harvest on glasshouse.



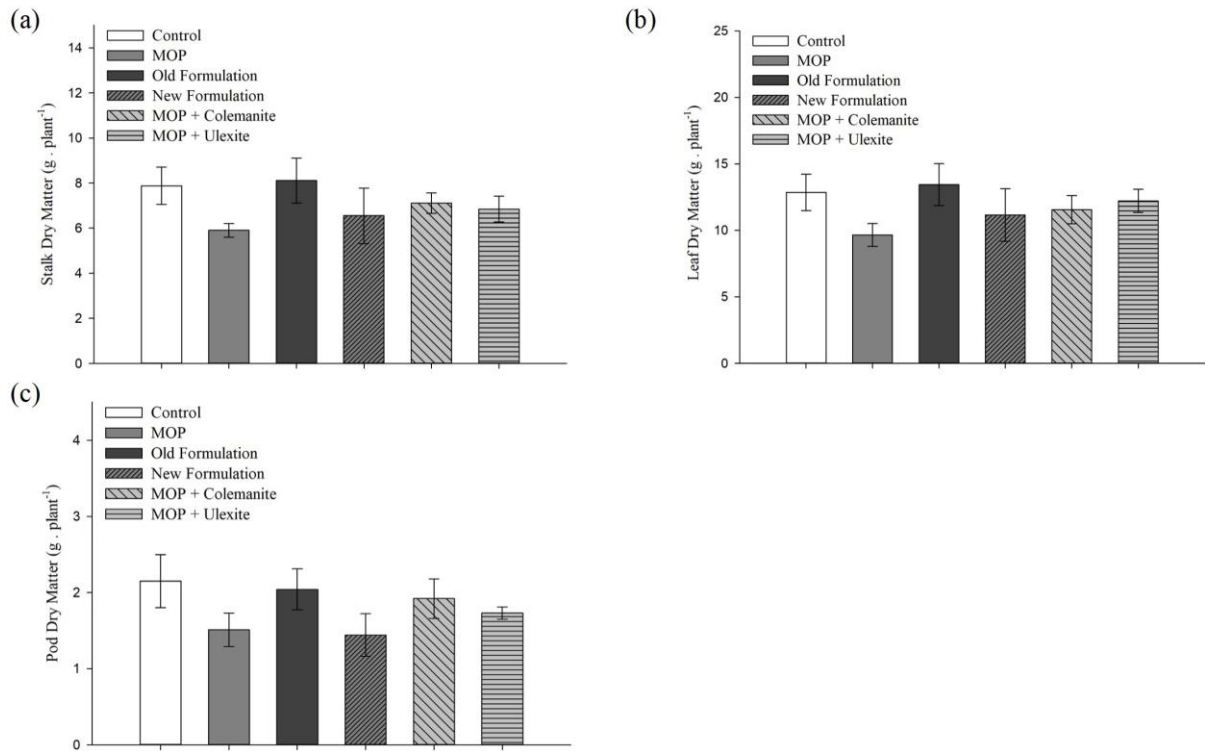
315

316 Field Trials

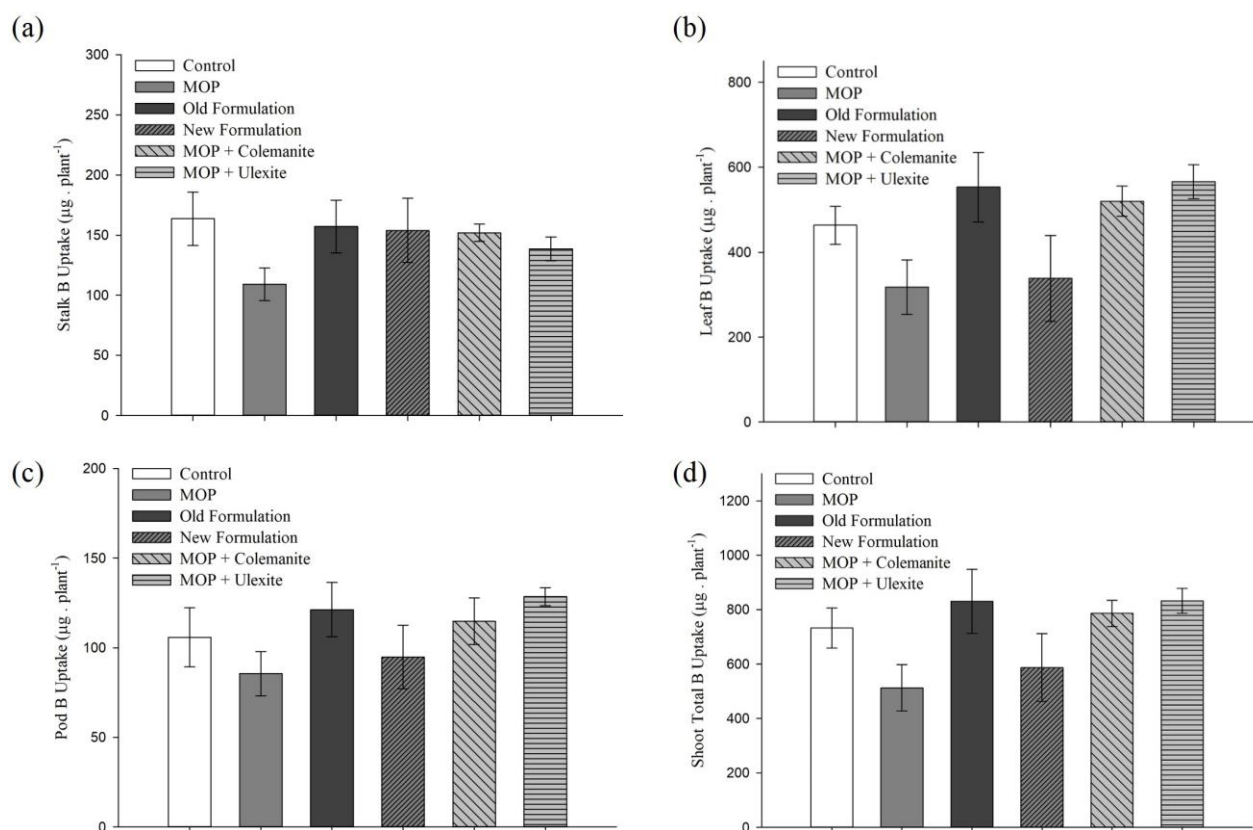
317 First Crop – Flowering Stage

318 Figure 12 shows the results for stalk, leaves and pods dry matters. At the testes
 319 conditions, the different B sources application did not implied in different values for these
 320 characteristics. The use of different boron sources did not resulted in statistical difference for
 321 B uptake too, as it is showed on figure 13. It implies that the different B sources did not differ
 322 for supplying this nutrient for the first crop plants under field conditions.

323 Figure 12: Dry matter of (a) stalk, (b) leaves, and (c) pod for first crop in flowering stage on
 324 field trial.



326 Figure 13: (a) Stalk, (b) leaf, (c) pod and (d) total B uptake for soybean as the first crop in
 327 flowering stage on field trial. Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD
 328 test at 0.05 probability level.



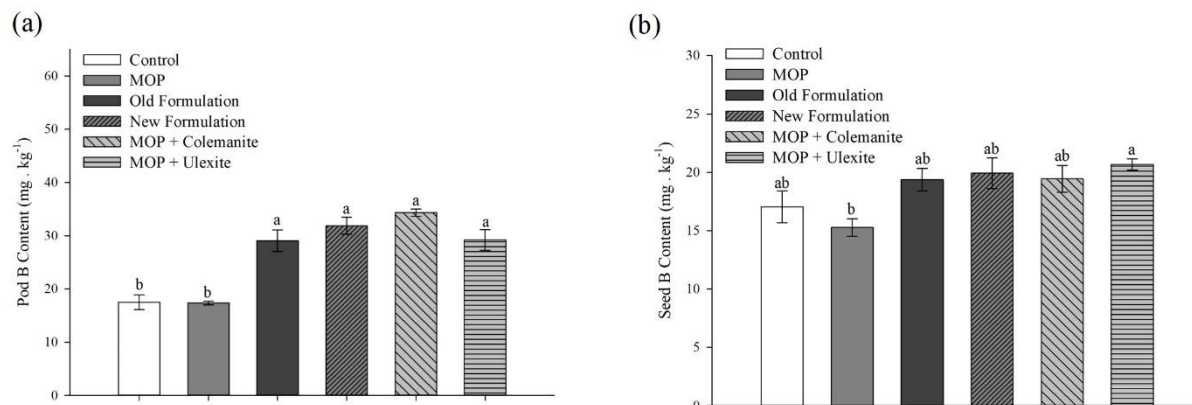
329

330 First Crop – Maturity Stage

331 The pod B content was smaller for treatments not supplied with B (fig. 14). Treatments
 332 supplied had no statistical difference among them for pod B contents, showing the different B
 333 sources had the same efficiency to afford B contents. MOP + Ulexite resulted in a bigger B
 334 content for the seeds, whereas MOP caused a lower content. The other treatments had
 335 intermediate values. Still, these different B contents in seeds did not imply in different grain
 336 yield and grain B uptake, inferring that it could have no sufficient B for new grain formation,
 337 to increase yield.

338 Figure 14: Maturity stage soybean (a) pod and (b) seed B Concentration on first crop field trial.
 339 Values followed by the same letter do not differ by Tukey-HSD test at 0.05 probability level.

340

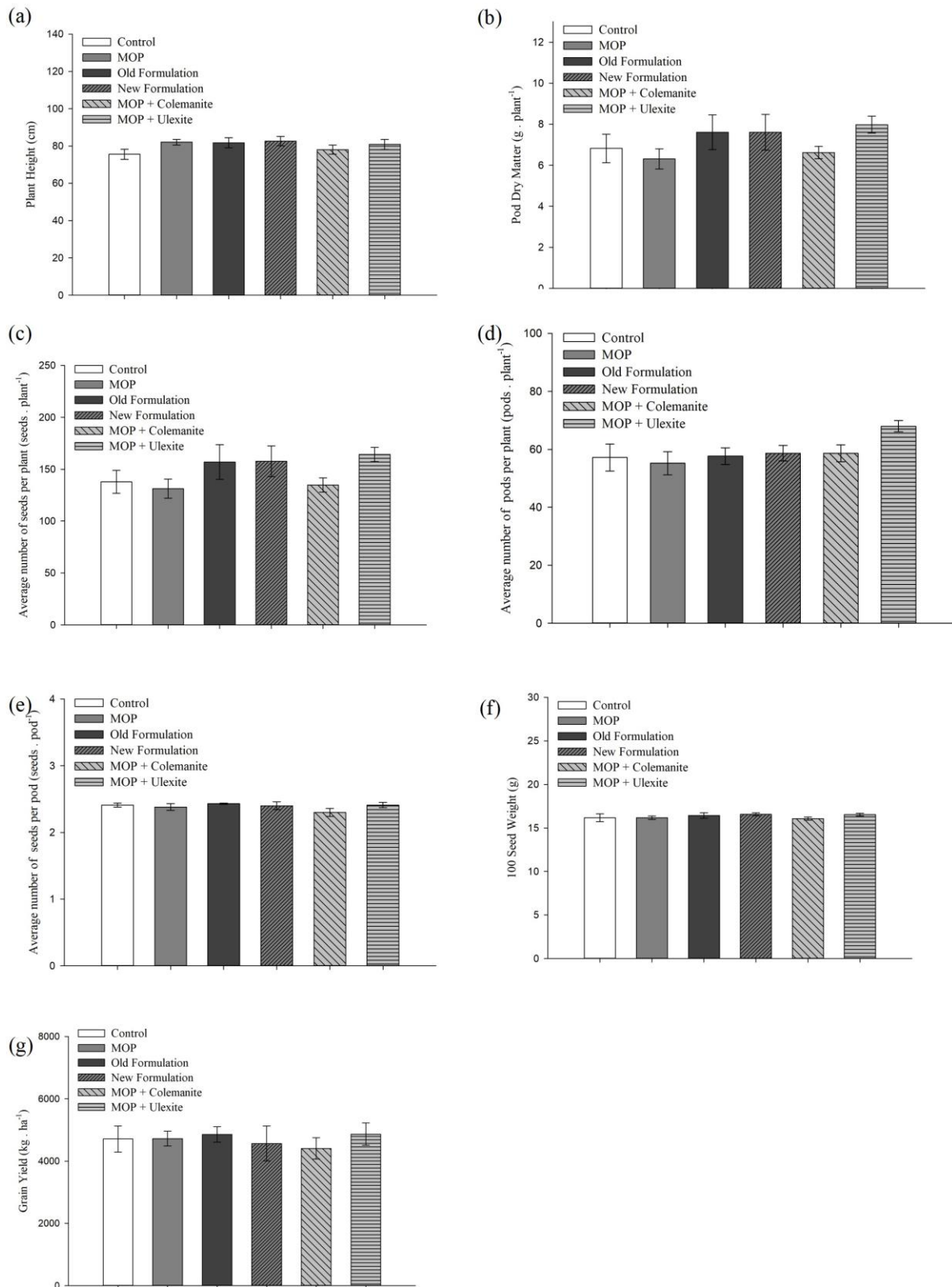


341

342

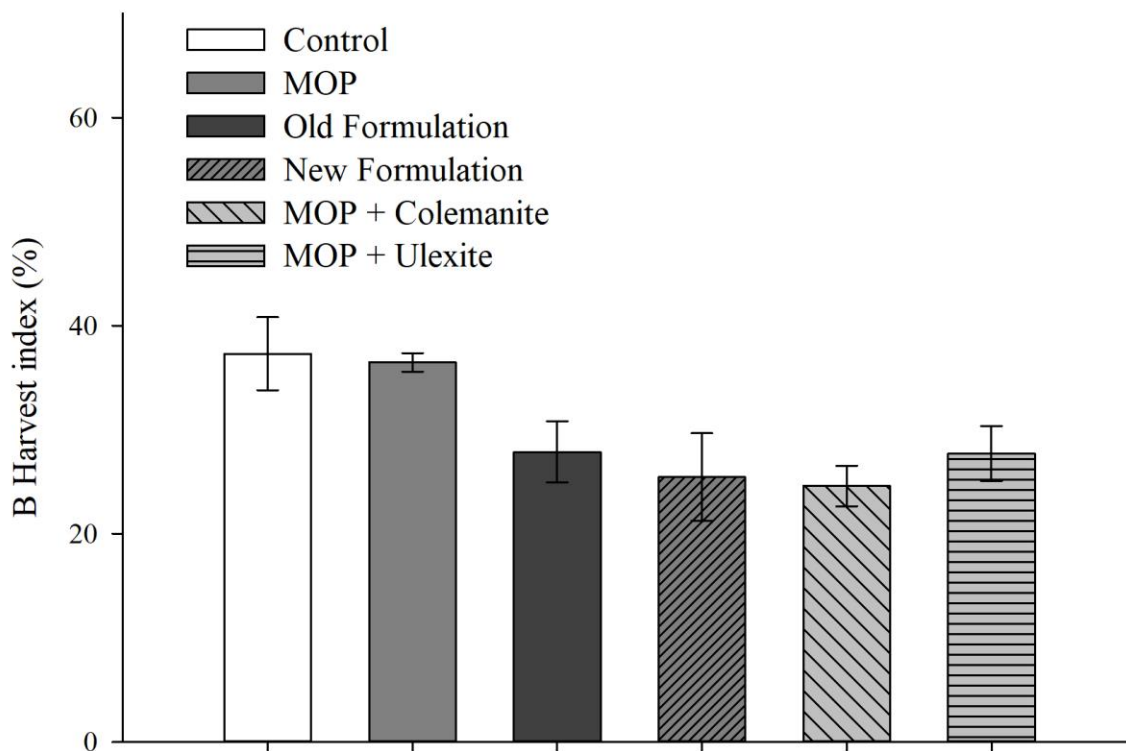
343 Even with B sources of different solubility, the amount of B necessary for this tested
 344 specie was provided equally in the field for plants contents (Figure 14), implying in no
 345 statistically different productivity parameter results, such as plant height, pod dry matter, pods
 346 per plant, seeds per pod, 100 seed weight, and grain yield at 13% humidity (Figure 15). In this
 347 case, the plants did not respond to the addition of B, even with a low availability for this nutrient
 348 in the soil. Devi et al. (2012) found that B supply affects plants yield. Bologna and Vitti (2006)
 349 did not find differences in orange production compounds for different B solubility sources,
 using doses up to 4 kg ha⁻¹.

350 Figure 15: Maturity stage soybean (a) plant height, (b) pod dry matter, average number of (c)
 351 seeds and (d) pods per plant, (e) seeds per pod, (f) 100 seed weight and (g) grain yield on first
 352 crop field trial.



354 Figure 16 shows the boron harvest index among the tested sources. It implies that, at
 355 the tested field conditions, the seed B uptake of the different B sources had the same efficiency
 356 nutrient utilization as if no B were used.

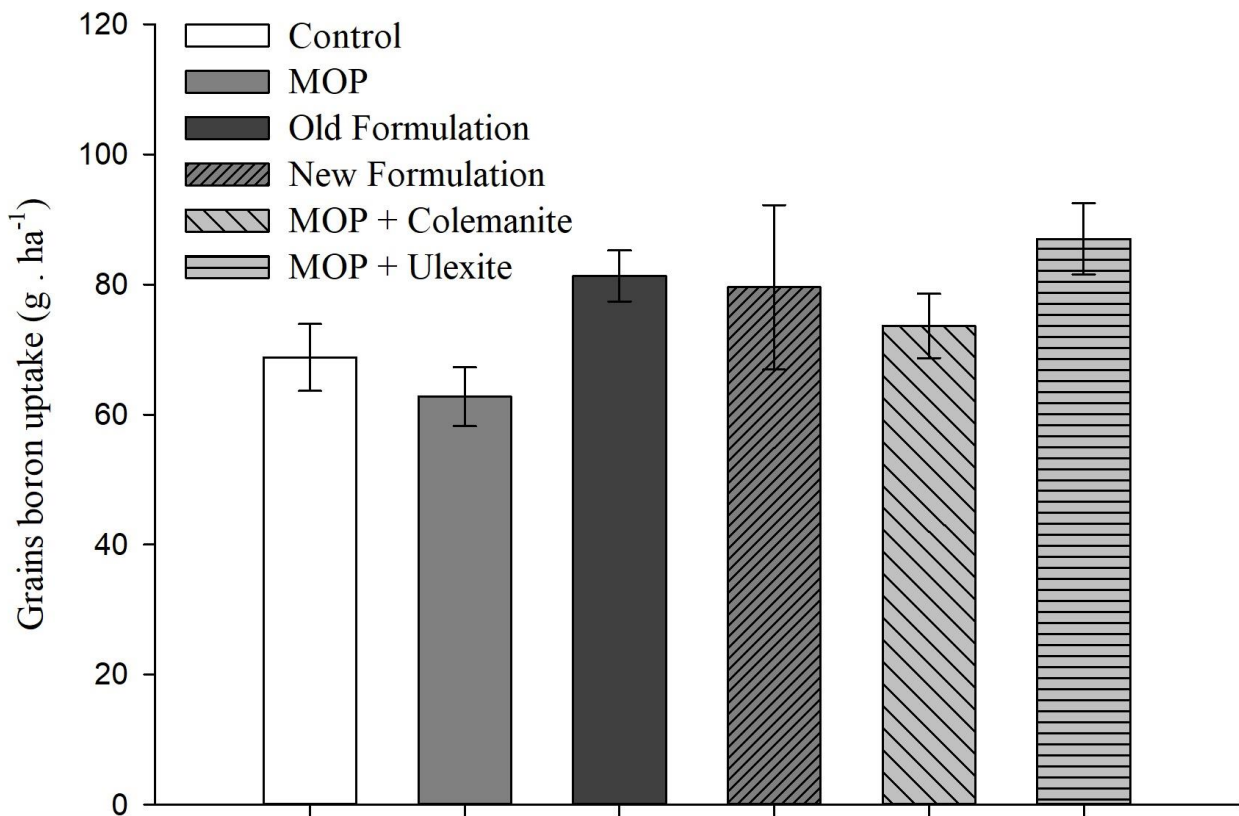
357 Figure 16: Boron harvest index for soybean on first crop field trial.



358 Figure 17 shows that grains B uptake had no statistical difference, with values ranging
 359 from 62.05 (MOP) to 87,02 g ha⁻¹ (MOP + Ulexite). These values are lower than those found
 360 by Bender (2015), which can suggest undernutrition for the soybean plants in our case study.
 361

362 Figure 17: Grain B uptake for soybean as first crop on field trial.

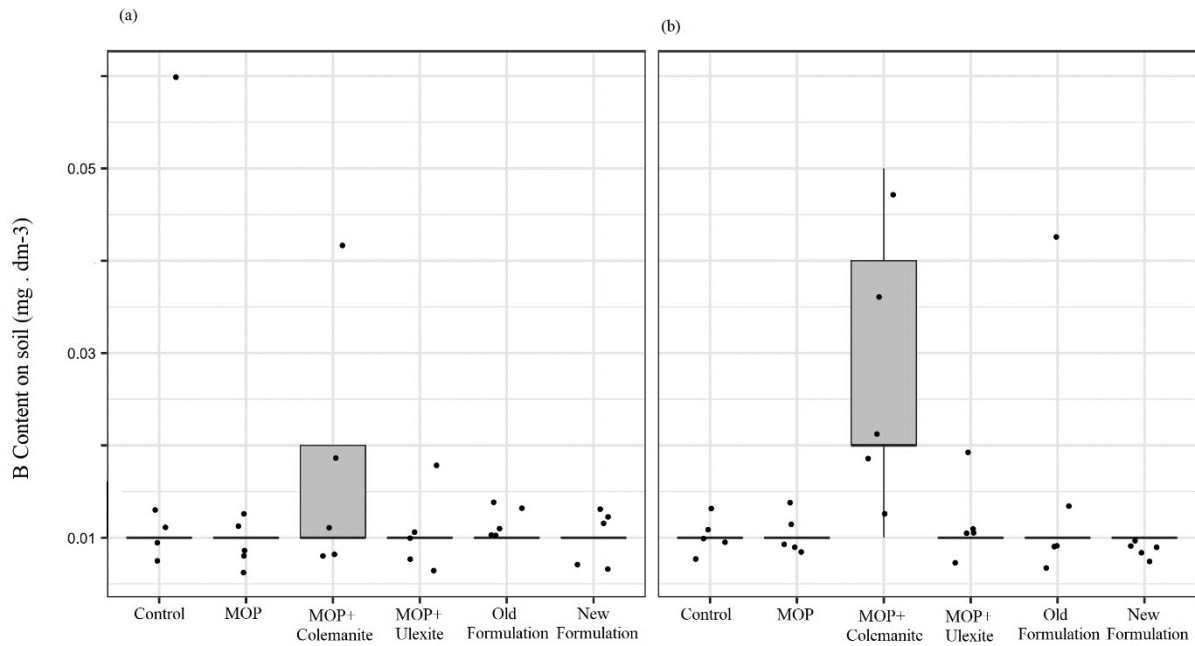
363



364

365 The different sources B contents on soil are shown in figure 18. All found values for B
 366 soil content are considered low or very low for most cultivated crops in Brazil (ALVAREZ et
 367 al., 1999; SOUSA & LOBATO, 2004), showing the different sources had no residual effect for
 368 an eventual second crop at the tested events.

369 Figure 18: Soil B contents at (a) 0-0.2 m and (b) 0.2-0.4m deep after the firs crop harvest.

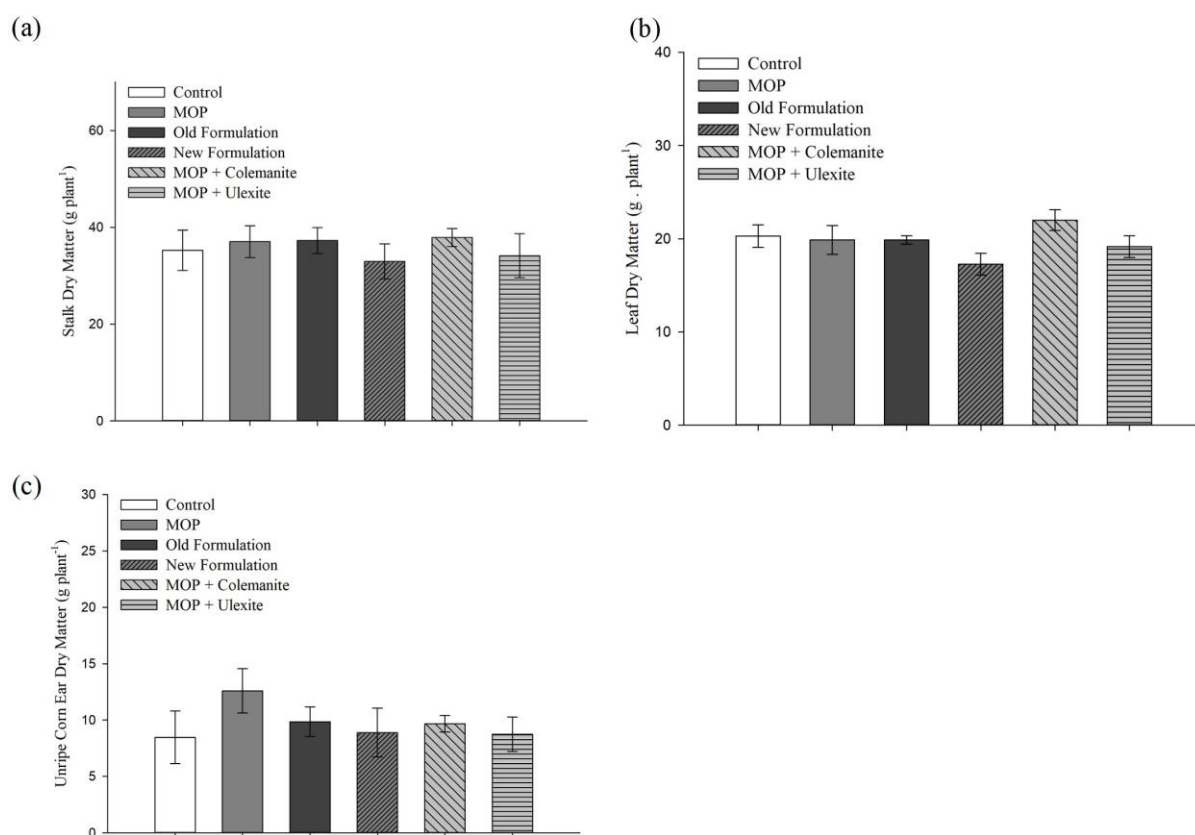


370

371 **Second crop**

372 Figure 19 shows that the different treatments did not present statistical difference for
 373 dry matter of stalk, leaves, or unripe corn ears for any treatment, showing they had the same
 374 efficiency for the second crop. It can indicate that, if there was a residual effect of the different
 375 sources, it did not result in yield difference.

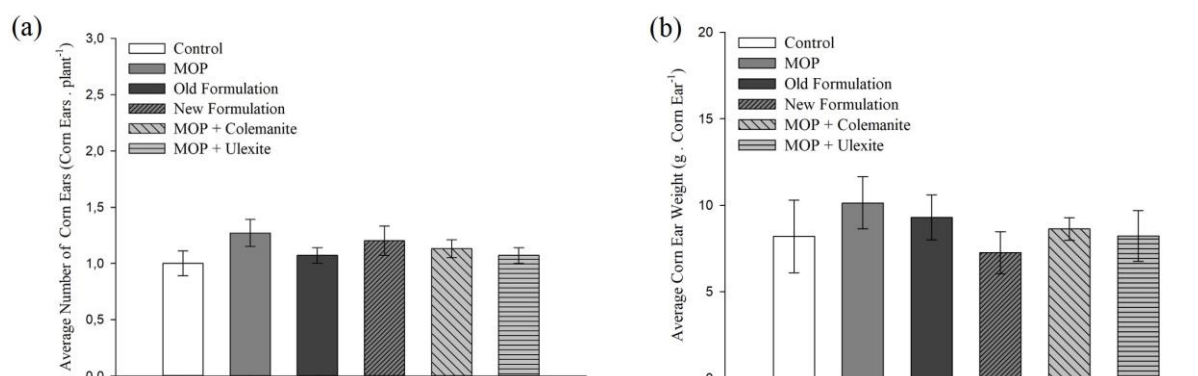
376 Figure 19: Dry matter of (a) stalk, (b) leaves and (c) unripe corn ear for corn as second crop on
 377 field trial.



378

379 All treatments were equally efficient for the number of corn ears per plant and average
 380 unripe corn ear weight (figure 20), implying that, like the results in the glasshouse trial, the
 381 different sources had no difference in providing differences in production parameters for a
 382 second crop. This suggests that the sources had no residual effect difference to the second crop.
 383 Other authors reached up to four years B residual effect, using colemanite and granulated
 384 ulexite, at a 6 kg B ha⁻¹ rate (HUNTER et al. 1990), which suggests that future experiments
 385 with the sources evaluated in our case study should consider an increase in the content of B in
 386 the fertilizers and/or the proportion of sources of low solubility.

387 Figure 20: Average (a) number of corn ears) and (b) corn ears weight for corn as second crop
 388 on field trial.

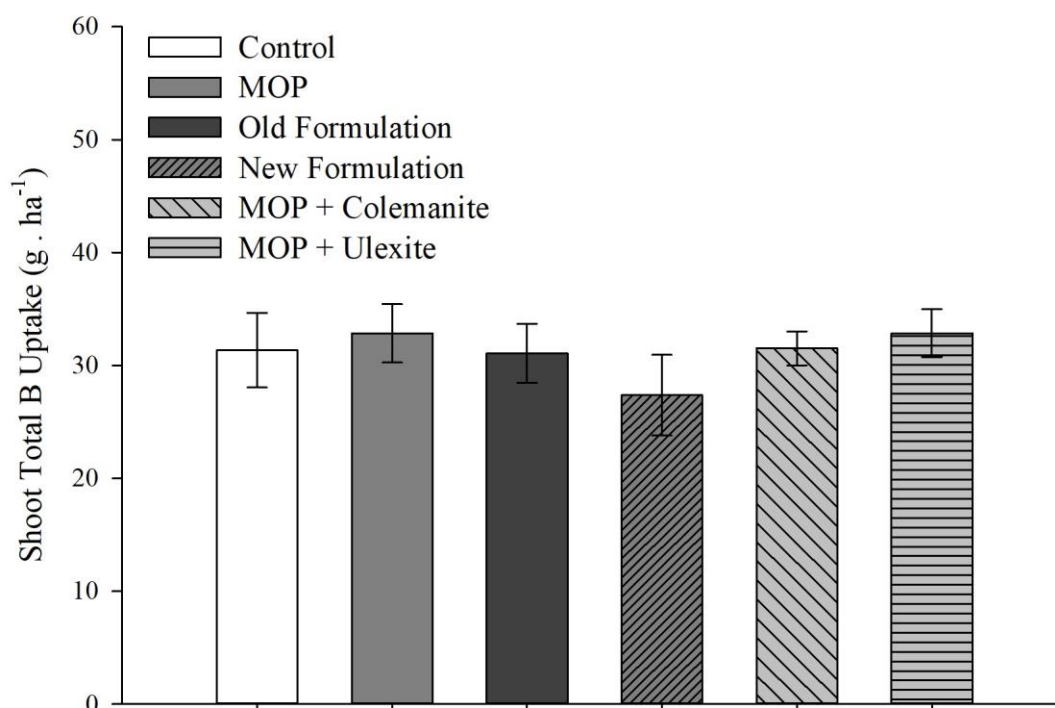


389

390 There was no statistical difference for the accumulation of B in the stem, corn ears, and
 391 total shoot for any treatment. Regarding the leaves, the MOP + Ulexite treatment was more
 392 efficient in accumulating B, while the control, MOP, New formulation, and MOP + Colemanite
 393 treatments were the ones that accumulated less. Both the Old and New formulations had
 394 intermediate values.

395 The different treatments were equally efficient for total B uptake (Figure 21), with
 396 values ranging from 27.37 to 32.87 g ha⁻¹ (New Formulation and MOP + Ulexite, respectively).
 397 These values are lower than found by Borges (2009) at the same stage, suggesting malnutrition
 398 for B in these plants. It can be concluded that, unlike the glasshouse trial, the different B sources
 399 had no residual effect for the second crop on these conditions on-field experiment. It can be
 400 explained because, under greenhouse conditions, there is a greater proportion of plant roots and
 401 the volume of soil to be explored, this allows the roots to have a greater use of soil nutrients.
 402 (MALAVOLTA, 1980).

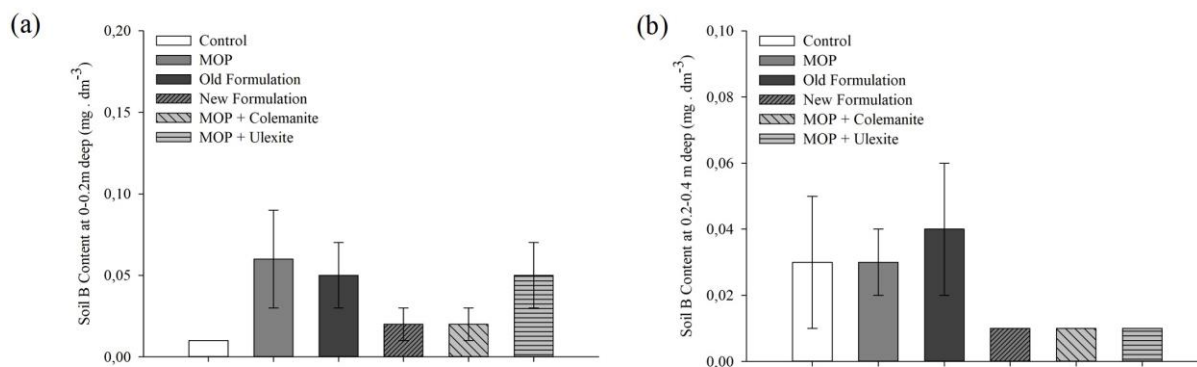
403 Figure 21: Shoot total B uptake for corn as second crop on field trial.



404

405 The soil B content after the second crop harvest showed no statistical difference among
 406 the sources (fig. 22). The values found are considered low or very low for most cultivated crops
 407 in Brazil (ALVAREZ et al., 1999; SOUSA & LOBATO, 2004). The tested soil has low silt
 408 and clay, soil fractions that afford a higher residual effect for boron fertilizers (LOPES, 1999),
 409 suggesting that it could contribute to the low residual effect observed in our case study.

410 Figure 22: Soil B content after the second crop harvest.



411

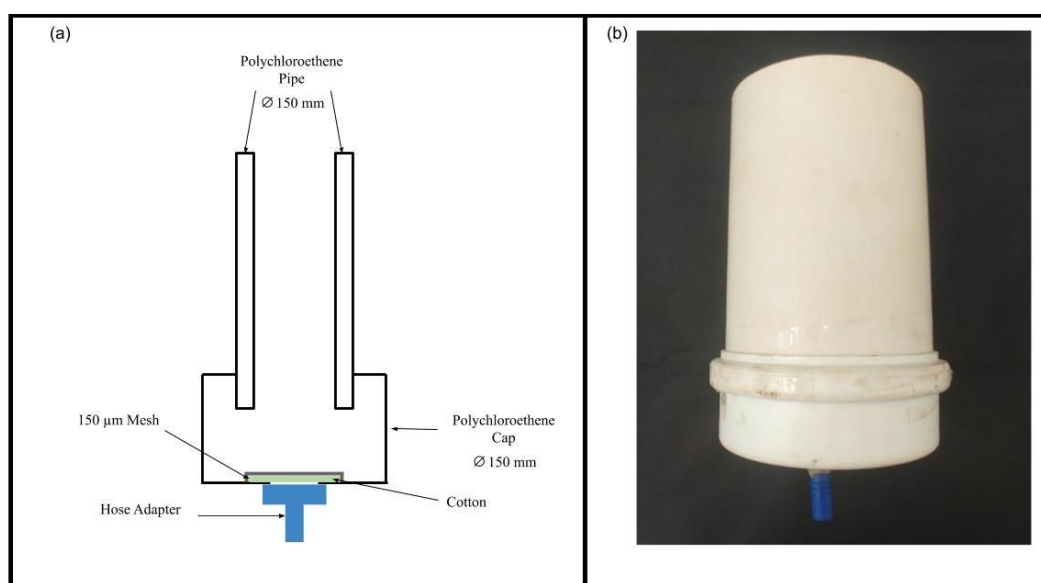
412 In the tested conditions, using the 4R Nutrient Stewardship for Improved Nutrient Use
413 Efficiency, the different B sources showed that the strategy of co-compact different solubility
414 B sources along with MOP can be a successful outline at the glasshouse trial, considering it
415 matches two of four targets: right source and right place. Although, it is needed to improve
416 some features, such as right rate and right time. Further studies are required in order to
417 ameliorate these characteristics and have a better nutrient use by plants on glasshouse and field
418 conditions.

419 ACKNOWLEDGMENTS

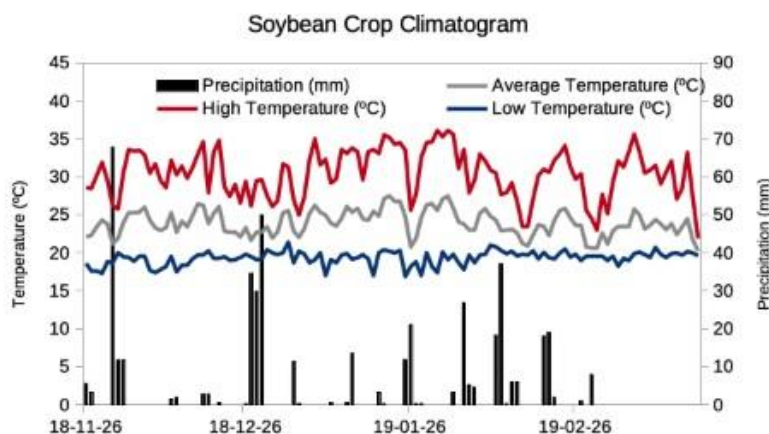
420 This work is supported by CNPq, FAPEMIG, CAPES and the Mosaic Company.

421 SUPPLEMENTAL MATERIAL

422 Figure 23: (a) Soil leaching column scheme and (b) view
423

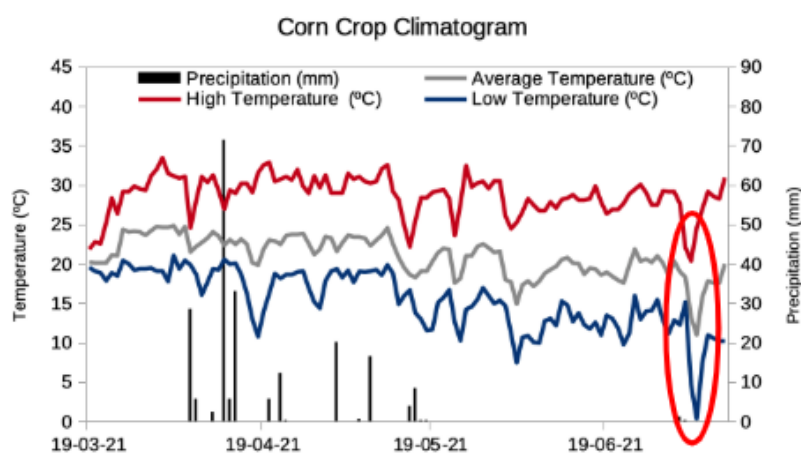


424 Figure 24: First crop on field trial climatogram
425



Sowing Date:
November 26th, 2018
Harvesting Date:
March 21st, 2019.
Average Temperature:
23.90°C (75.02°F)
Total Precipitation:
443.4 mm

426 Figure 25: Second crop on field trial climatogram.
427



Sowing Date:
March 21st, 2019.
Harvesting Date:
July 12th, 2019.
Average Temperature:
20.98°C (69.76°F)
Total Precipitation:
74.4 mm

428

429

REFERENCES

- 430 Abat, M.; Degryse, F.; Baird, R. & McLaughlin, M. (2015). Slow-release boron fertilisers:
431 Co-granulation of boron sources with mono-ammonium phosphate (MAP). *Soil Research*,
432 53, 505-511. Doi: 10.1071/SR14128.
- 433 Alvarez, V.H.; Movais, R.F.; Barros, N.F.; Cantarutti, R.B.C.; Lopes, A.S. (1999)
434 Interpretação dos resultados de análise de solo. (In Portuguese) In RIBEIRO, A.C.;
435 GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H *Recomendações para o uso de corretivos e*
436 *fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação*. Viçosa, MG: UFV.
- 437 Bell, R.W. (1997). Diagnosis and prediction of boron deficiency for plant production. *Plant*
438 *Soil*, 193, 149–168. doi:10.1023/A:1004268110139

- 439 Bender, R. R., Haegele, J. W., & Below, F. E. (2015). Nutrient uptake, partitioning, and
440 remobilization in modern soybean varieties. *Agronomy Journal*, 107(2), 563-573.
441 doi:10.2134/agronj14.0435
- 442 Bindraban, P. S., Dimkpa, C., Angle, S., & Rabbinge, R. (2018). Unlocking the multiple
443 public good services from balanced fertilizers. *Food Security*, 10, 273–285.
444 <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0769-4>
- 445 Bindraban, P. S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A., & Rabbinge, R. (2015). Revisiting
446 fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and*
447 *Fertility of Soils*, 51, 897–911. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>
- 448 Bindraban, P. S., Dimkpa, C. O., White, J. C., Franklin, F. A., Melse-Boonstra, A., Koele, N.,
449 ... & Schmidt, S. (2020). Safeguarding human and planetary health demands a fertilizer
450 sector transformation. *Plants, People, Planet*. 2020;00:1–8.
451 <https://doi.org/10.1002/ppp3.10098>
- 452 Bindraban, P.S., Dimkpa, C.O. & Pandey, R. (2020) Exploring phosphorus fertilizers and
453 fertilization strategies for improved human and environmental health. *Biol Fertil Soils*, 1-
454 19. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01430-2>
- 455 Borges, I. D., Von Pinho, R. G., & Pereira, J. L. D. A. R. (2009). Micronutrients
456 accumulation at different maize development stages. *Ciência e agrotecnologia*, 33(4),
457 1018-1025. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000400011>
- 458 Bologna, I. R., & Vitti, G. C. (2006). Yield and quality of 'Pera' sweet orange in effect of
459 boron source and doses (In Portuguese, with English abstract) *Revista Brasileira de*
460 *Fruticultura*, 28(2), 328-330. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452006000200040>
- 461 Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., Lassaletta, L., Van Apeldoorn, D. F., Van Grinsven, H.
462 J. M., Zhang, J., & Van Ittersum, M. K. (2017). Lessons from temporal and spatial
463 patterns in global use of N and P fertilizer on crop- land. *Scientific Reports*, 7, 40366.
464 <https://doi.org/10.1038/srep40366>
- 465 Brennan, R. F.; Bell, R. W.; Frost, K. (2015) Risks of Boron Toxicity in Canola and Lupin by
466 Forms of Boron Application in Acid Sands of South-Western Australia. *Journal of Plant*
467 *Nutrition*, 38 (6) 920-937. Doi: 10.1080/01904167.2014.964363
- 468 Broschat, T.K. (2018). Release rates of soluble and controlled release boron fertilizers.
469 *HortTechnology.*, 18, 471-474. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.18.3.471>
- 470 Carvalho, A.M.X.; Mendes (2017). SPEED Stat: a minimalist and intuitive spreadsheet
471 program for classical experimental statistics. *Anais da 62ª Reunião Anual da Região*
472 *Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria*, 2017.
- 473 Dass, A.; Baiswar, P.; Patel, D. P.; Munda, G. C.; Ghosh, P. K.; & Chandra, S. (2010).
474 Productivity, nutrient harvest index, nutrient balance sheet and economics of lowland rice
475 (*Oryza sativa*) as influenced by composts made from locally available plant biomass.
476 *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 80(8), 686-690.
- 477 Dell B.; Huang L.; Bell R.W. (2002). Boron in Plant Reproduction. In: Goldbach H.E.,
478 Brown P.H., Rerkasem B., Thellier M., Wimmer M.A., Bell R.W. (eds) *Boron in Plant*
479 *and Animal Nutrition*. Springer, Boston, MA
- 480 Devi, K. N., Singh, L. N. K., Singh, M. S., Singh, S. B., & Singh, K. K. (2012). Influence of
481 sulphur and boron fertilization on yield, quality, nutrient uptake and economics of

- 482 soybean (*Glycine max*) under upland conditions. *Journal of Agricultural Science*, 4(4), 1-
483 10.
- 484 Dimkpa, C., & Bindraban, P. (2018). Nanofertilizers: New products for the industry? *Journal*
485 *of Agriculture and Food Chemistry*, 66, 6462–6473.
486 <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02150>
- 487 Ferguson, D.; Olson, R.; Heinbigner. (2016) Compacted muriate of potash fertilizers
488 containing micronutrients and methods of making same. U.S. Patent No. 9.266,784 B2.
- 489 Freddi, O. da S.; Tavanti, R. F. R.; Soares, M. B.; Almeida, F. T. de.; Peres, F. S. C. (2017).
490 Physical-chemical quality of a latossol under direct seeding and soybean-corn succession
491 in the cerrado-amazonian ecotone. *Revista Caatinga*, 30(4), 991-1000.
492 <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n420rc>
- 493 Hunter, I. R.; Will, G. M.; Skinner, M. F. (1990) A strategy for correction of boron
494 deficiency in radiata pine plantations in New Zealand. *Forest Ecology and Management*,
495 v.37, 1/3,77-82.
- 496 Ierna, A., Pellegrino, A., & Malvuccio, A. (2017). Effects of micronutrient fertilization on the
497 overall quality of raw and minimally processed potatoes. *Postharvest biology and*
498 *technology*, 134, 38-44. doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.08.006
- 499 Johnston, A. M.; & Bruulsema, T. W. (2014). 4R nutrient stewardship for improved nutrient
500 use efficiency. *Procedia Engineering*, 83, 365-370.
- 501 Lopes, A. S., & Guilherme, L. R. G. (2016). A career perspective on soil management in the
502 Cerrado region of Brazil. In *Advances in Agronomy* (37, 1-72). Academic Press.
- 503 Lopes, A. S. (1999). *Micronutrientes: filosofias de aplicação e eficiência agrônômica*. São
504 Paulo: ANDA.
- 505 Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. (1997) *Avaliação do estado nutricional das*
506 *plantas: princípios e aplicações* (in Portuguese) . 2. ed. Piracicaba.
- 507 Malavolta, E. (1980). *Elementos de nutrição mineral de plantas* (In Portuguese). São Paulo:
508 Agrônômica Ceres.
- 509 Mortvedt, J. J., & Woodruff, J. R. (1993). *Technology and application of boron fertilizers for*
510 *crops. Boron and its role in crop production*. CRC Press, Boca Raton, FL, 158-174.
- 511 Muchow, R. C. (1985) Phenology, seed yield and water use of grain legumes grown under
512 different soil water regimes in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*,
513 11, 81-97. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(85\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0378-4290(85)90093-0)
- 514 OCDE/FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED
515 NATIONS. OCDE-FAO. *Perspectivas Agrícolas 2015-2024*. OECD Publishing, Paris.
516 Disponível em: https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-es. Acesso em: 2 Fev. 2019.
- 517 Rada, N. (2015) Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle: an update. *Revista de*
518 *Economia e Agronegócio*, 11(1), 1-38. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.164085>
- 519 Research and Markets. (2017). *Global specialty fertilizers market analysis & trends –*
520 *Industry forecast to 2025*.
- 521 Saleem, M., Yusop, M. K., Ishak, F., Samsuri, A. W., & Hafeez, B. (2011). Boron fertilizers
522 borax and colemanite application on rice and their residual effect on the following crop
523 cycle. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(3), 403-410.

- 524 Santos, G. A., Korndorfer, G. H., Pereira, H. S., & Paye, W. (2018). Addition of
525 micronutrients to NPK formulation and initial development of maize plants. *Bioscience*
526 *Journal*, 34(4), 927–936. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n1a2018-36690>
- 527 Shorrocks, V. (1997) The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil* 193,
528 121–148. doi:10.1023/A:1004216126069
- 529 da Silva, R. C., Baird, R., Degryse, F., & McLaughlin, M. J. (2018). Slow and Fast-Release
530 Boron Sources in Potash Fertilizers: Spatial Variability, Nutrient Dissolution and Plant
531 Uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 82(6), 1437-1448.
- 532 Sillanpää, M. (1982) *Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study*. Food and
533 agriculture organization of the United Nations. FAO Soil Bulletin 48. Rome
- 534 Sims, J. T., & Johnson, G. V. (1991). Micronutrient soil tests. *Micronutrients in agriculture*,
535 4, 427-476.
- 536 Solos, E. (2006). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa
537 de Solos: Rio de Janeiro.
- 538 Sousa, D.M.G. De; Lobato, E. (2004) *Cerrado: correção do solo e adubação* (In Portuguese).
539 Planaltina: Embrapa Cerrados, v. 416
- 540 Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.; Murphy, A. (2017) *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (In
541 Portuguese). 6.ed. Porto Alegre: Artmed.
- 542 Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de*
543 *métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, 4.
- 544 Tollefson, J. (2010) The Global Farm. *Nature*, 466, 554-556.
- 545 Wang, Q., Lu, L., Wu, X., Li, Y., & Lin, J. (2003). Boron influences pollen germination and
546 pollen tube growth in *Picea meyeri*. *Tree physiology*, 23(5), 345-351.
- 547 Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., ... & Jonell,
548 M. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets
549 from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492.