

JÚLIO CÉSAR PATRÍCIO DE SOUZA LIMA

**BORO EM SOLOS DE PERNAMBUCO: NÍVEIS CRÍTICOS, TOXICIDADE E
DISPONIBILIDADE**

RECIFE- PE

2005

JÚLIO CÉSAR PATRÍCIO DE SOUZA LIMA

**BORO EM SOLOS DE PERNAMBUCO: NÍVEIS CRÍTICOS, TOXICIDADE E
DISPONIBILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de mestre.

RECIFE- PE

2005

**BORO EM SOLOS DE PERNAMBUCO: NÍVEIS CRÍTICOS, TOXICIDADE E
DISPONIBILIDADE**

JÚLIO CÉSAR PATRÍCIO DE SOUZA LIMA

Dissertação defendida e aprovada em 30 de maio de 2005 pela banca
examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento
UFRPE

Examinadores:

Prof. Dr. Gustavo Pereira Duda
UFRPE

Prof. Ph.D. Mário de Andrade Lira Júnior
UFRPE

Prof. Dr. Fernando José Freire
UFRPE

A meus pais, Pedro e Nair,
meus irmãos, Jacqueline e
Jarbas e, meu sobrinho,
Victor.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me ajudado em todos os momentos e acredito bastante que sempre estará comigo.

Aos meus pais, meus irmãos, meu sobrinho mais uma vez e ainda a Márcia pelo apoio prestado durante toda a jornada.

Aos meus queridos amigos, importantes durante todo o trabalho nas horas difíceis e de divertimento: Arlete, Euzelina, Valdi, Évio, Cristiane (Gorete), Gutti, Romero, Luís, Isaac e com um carinho bastante especial para Júlio Guilherme, Eduardo (Dú), Rita (Patricinha), Castro e Gledson.

Aos professores (as): Bethânia, Sheila, Gustavo, Júlio Villar, Emídio, Clístenes, Ramon, Fátima, Mário, Fernando, Lilian e todos os professores do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e da Graduação (Agronomia) pela infinita contribuição.

À participação dos funcionários: Eliane, Camilo, Anacleto, Luciano, Zeca, Josias, Socorro, Noca, Josué, Glória, Silvana e ainda a Seu Luís, Edna, Ana (COMUT), pela ajuda e participação.

Aos amigos de laboratório: Tati, Hercylio, Jefferson, Davi, Paulo, Wagner, Rosemberg, Sílvio, Alexandre, Pedro I, Pedro II, Emídio da graduação e, Flávio, Alexandre, Josângela, Paulo I, Paulo II, Izabelle e Samuel (doutorado).

Aos bons momentos de alegria com: Michelângelo I, Michelângelo II, Patrícia, Eduardo, Fátima, Karina, Priscila, Marcela, Sebastião, Edivan, Dagmar, Daniela (Bananinha), Daniela (física do solo), Tati (física do solo).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	03
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1. Interação e resposta das espécies vegetais a concentrações de Boro.....	04
2.2. Reação do Boro no solo.....	06
3 MATERIAL E MÉTODOS	08
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
4.1. Produção de matéria seca de milho em resposta a doses crescentes de B.....	12
4.2. Níveis críticos.....	21
5 CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classes de solos selecionadas nas regiões fisiográficas do estado de Pernambuco.....	09
Quadro 2. Atributos químicos e físicos dos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco.....	10
Quadro 3. Resumo da análise da variância da matéria seca da parte aérea vs doses de B (mg dm^{-3}) aplicadas a solos de Pernambuco.....	12
Quadro 4. Produção de matéria seca da parte aérea de milho (g vaso^{-1}) sob diferentes doses de B em solos do estado de Pernambuco.....	13
Quadro 5. Teores de B recuperado pelos extratores nos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco.....	15
Quadro 6. B na parte aérea de milho com a aplicação das doses 0 a 12 mg dm^{-3} nos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco.....	17
Quadro 7. Coeficientes de correlação linear simples entre B recuperado (mg kg^{-1}) pelos extratores e características da planta e dos solos de Pernambuco utilizados no ensaio.....	18
Quadro 8. Coeficientes de correlação linear simples entre teor de B na parte aérea do milho (mg kg^{-1}) e características da planta e dos solos de Pernambuco utilizados no ensaio.....	19
Quadro 9. Equações de regressão ajustadas entre a produção de matéria seca da parte aérea de milho (g vaso^{-1}) como variável dependente das doses de B aplicadas (mg dm^{-3}) aos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco.....	22
Quadro 10. Níveis críticos e tóxicos de B correspondentes a 95% e 90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea de milho (em g vaso^{-1}) e redução de 10% desta, estimados pelos extratores Mehlich-1, $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e água quente em solos de Pernambuco.....	23
Quadro 11. Equações de regressão ajustadas entre o B recuperado pelos três extratores (Y em mg kg^{-1}) como variável dependente das doses de B aplicadas (X em mg dm^{-3}) aos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco.....	24

Quadro 12. Níveis críticos e tóxicos de B correspondentes a 95% e 90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea (em g vaso ⁻¹) e redução de 10% desta, estimados pelos teores e conteúdos de B em milho.....	25
Quadro 13. Equações de regressão ajustadas entre o teor de B (Y em mg kg ⁻¹) e B na parte aérea (Y em mg vaso ⁻¹) como variável dependente das doses de B aplicadas (X em mg dm ⁻³) aos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco	26

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Plantas de milho com 17 dias de cultivo no Planossolo Háplico apresentando toxicidade de B na dose 12 mg dm^{-3}	20
Foto 2. Plantas de milho com 32 dias de cultivo no Latossolo Vermelho-Amarelo, apresentando manchas necróticas nas margens das folhas na dose 12 mg dm^{-3} de B.....	20
Foto 3. Plantas de milho com 24 dias no Planossolo Háplico e Planossolo Nátrico, apresentando sintomas de toxicidade de B na dose 12 mg dm^{-3}	21

LIMA, J. C. P. S. de L.

RESUMO

BORO EM SOLOS DE PERNAMBUCO: NÍVEIS CRÍTICOS, TOXICIDADE E DISPONIBILIDADE

Pesquisas sobre a disponibilidade de B em solos são necessárias para avaliar o comportamento das culturas sob diferentes teores disponíveis deste elemento no solo. Com esta finalidade, foi conduzido um experimento em casa de vegetação para avaliar a resposta de milho (*Zea mays*) a doses de boro (0, 2, 4, 6 e 12 mg dm⁻³) em dez solos de Pernambuco. As variáveis avaliadas foram B na planta e matéria seca da parte aérea. O B disponível foi determinado por três extratores: água quente, ácido clorídrico 0,05 mol L⁻¹ e Mehlich-1. Além disto, identificou-se os níveis críticos (90% e 95% da produção máxima de matéria seca) e tóxicos (equivalente a redução de 10% da produção máxima) nos solos e na planta. Foram ainda descritos sintomas de toxicidade de B em milho. Os resultados demonstraram que a produção de matéria seca foi influenciada pelas doses de boro aplicadas em apenas 5 dos dez solos estudados, o que sugere baixo potencial de resposta à adubação com B para a maioria dos solos das regiões do Agreste e Zona da Mata de Pernambuco. O extrator que obteve a melhor correlação com o teor de B na planta foi o HCl 0,05 mol L⁻¹, seguido do Mehlich-1 e pela água quente. A obtenção dos níveis críticos e tóxicos foi possível em dois solos da Zona da Mata (Latosolo Amarelo e Nitossolo) e três do Agreste (Planossolo Háplico, Planossolo Nátrico e Argissolo Amarelo), que variaram de 0,36 mg kg⁻¹ e 2,34 mg kg⁻¹ (críticos) e de 1,82 mg kg⁻¹ a 8,32 mg kg⁻¹ (tóxicos) nos solos. Na planta, os níveis críticos de B variaram de 7,50 mg kg⁻¹ e 129,58 mg kg⁻¹ e os níveis tóxicos de 43,26 mg kg⁻¹ a 372,42 mg kg⁻¹. Os solos que apresentaram plantas com maior teor de B no tecido vegetal apresentaram sintomas mais graves de toxicidade, visualizadas como necrose das margens das folhas mais velhas, assim como caules mais delgados, fatores associados à maior disponibilidade de boro em textura mais arenosa e/ou baixos teores de matéria orgânica.

LIMA, J. C. P. S. de L.

ABSTRACT

BORON IN SOILS OF PERNAMBUCO: CRITICAL LEVELS, PHYTOTOXICITY, AND AVAILABILITY

Research on boron (B) availability in soils is essential for assessing the crop response to different concentrations of available B in soil. An experiment was carried out in greenhouse aiming at studying the corn plants (*Zea mays*) response to B doses (0, 2, 4, 6, and 12 mg dm⁻³) applied to ten soils of Pernambuco state, Brazil. Available B was assessed by three extractants: hot water, HCl 0.05 mol L⁻¹, and Mehlich-1. The critical and toxic levels were determined in soils and plants. Additionally, B toxicity symptoms in corn plants were recorded. The results showed that the dry matter production was affected only in five out of ten soils studied. This result suggests a low potential for B fertilization response for most of the soils of *Agreste* and *Mata* regions. HCl 0.05 mol L⁻¹ was the extractant best correlated with B concentration in plants, followed by Mehlich-1 and hot water. The determination of critical and toxic levels was feasible in two soils of *Mata* region (Yellow Oxisol and Nitosol) and three soils of *Agreste* (Haplic Planosol, Natric Planosol and Yellow Argisol). The critical levels in such soils are in the 0.36 to 2.34 mg kg⁻¹ range while the toxic level varies from 1.82 to 8.32 mg kg⁻¹. In plants, B critical levels ranged from 7.50 to 129.58 mg kg⁻¹. Plants displayed B toxicity symptoms in B plant concentrations varying from 43.26 to 372.42 mg kg⁻¹. Soils on which plants posed the highest B concentration also displayed the most acute toxicity symptoms. Such symptoms were characterized by necrosis on margins of older leaves as well as stem thinning. These symptoms were most common in plants grown on sandy and low organic matter soils.

1 INTRODUÇÃO

O estudo da mobilidade e compartimentalização dos elementos essenciais no solo, visando uma maior produtividade, apresenta desafios relacionados a otimização do uso de fertilizantes. Neste contexto, percebe-se a importância da aplicação de quantidades adequadas de adubos às necessidades das culturas, especialmente para micronutrientes, devido a estreita faixa de deficiência e toxicidade. O boro é um nutriente responsável por algumas importantes reações fisiológicas nas plantas, tais como transporte de ácido indolacético, atividade da ATPase (GOLDBACH et al., 2001), integridade da membrana e síntese da parede celular, metabolismo fenólico (Ferri, 1985), do RNA e de carboidratos, respiração e lignificação (GUPTA, 1993). O B de forma geral possui baixa mobilidade no floema da maioria das espécies vegetais, com exceção das produtoras de itóis (sorbitol, dulcitol e manitol, nos quais o micronutriente se complexa e é translocado), apresentando diferentemente das demais espécies, sintomas de deficiência em folhas mais velhas e toxicidade em folhas novas (FERREIRA et al., 2001 a).

No solo, o B apresenta-se geralmente em maior quantidade na matéria orgânica, o que sugere a sua maior probabilidade de escassez em solos arenosos. A disponibilidade deste micronutriente também dependerá do material de origem e da mineralogia, pois reações com óxidos de ferro e alumínio (ROCHA, 1995) controlam sua solubilidade. Na determinação de B disponível nos solos, ainda há de se considerar dificuldades operacionais que comprometem os resultados, como as interferências de outros elementos na dosagem, especialmente ferro (FERREIRA et al., 2002), bem como a inexistência de um extrator universal adequado para avaliação da disponibilidade de B em todos os solos. Na quantificação do B, o método mais utilizado é o colorimétrico e, estes constituintes (dos solos) podem mascarar os valores obtidos e prejudicar a acurácia das análises.

Outro fator a considerar na disponibilidade de B, refere-se às reduzidas fontes bibliográficas ressaltando o efeito deste nutriente no Brasil, nas espécies vegetais e nos solos. Em alguns estados, como Pernambuco, ou mesmo na região Nordeste, não existe nenhum estudo recente, identificando nem ao menos as quantidades de B disponível na camada superficial dos solos, nas regiões fisiográficas. Apenas Horowitz; Dantas (1973) publicaram um trabalho sobre quantificação de B na Zona Litoral-Mata

do Estado. Face a isto, fica claro a importância de caracterizar os teores de B disponíveis às plantas, e a distinção de níveis críticos do elemento nos solos, visando obter informações antes de uma adubação com boro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Interação e resposta das espécies vegetais a concentrações de boro

O B é um micronutriente de comportamento dinâmico nas diferentes culturas, considerando a sua absorção, transporte na seiva, ligação em estruturas distintas (GOLDBERG; GRIEVE, 2003; DANNELE et al., 2002), bem como sua influência sobre compostos relacionados ao desenvolvimento da planta. Gupta (1993) ressalta a capacidade do elemento em formar complexos com compostos do grupo cis-diol, à maior permeabilidade de $B(OH)_3$ comparada à forma aniônica $B(OH)_4^-$ e, juntamente com o cálcio, participando na estabilização de constituintes da parede celular. Pfeffer et al. (1999), trabalhando com girassol com diferentes concentrações de boro em solução nutritiva, constataram que a absorção de B é rápida, dependendo dos teores de ácido bórico entre simplasma e apoplasma.

Percebe-se entre as espécies agrícolas, a importância de identificar a faixa ideal de suprimento de B para cada cultura, visando obter máxima produção. Desta forma, muitos trabalhos têm enfatizado a absorção, disponibilidade e sintomas de carência e excesso do elemento. Destaca-se nesse aspecto a maior suscetibilidade à deficiência das leguminosas forrageiras em relação às gramíneas e, ainda, as maiores respostas de algumas culturas ao micronutriente, a exemplo do algodão, soja, amendoim e a família das brássicas (FERREIRA et al., 2001a).

Quanto aos aspectos morfológicos de deficiência e toxicidade de B, consideram-se os comportamentos particulares de cada cultura. Anormalidades como ausência de brotações, folhas com ondulações e clorose no ápice do limbo em tangerina "Poncã" foram associadas à deficiência de boro, sintomas esses ocorridos por causa dos teores baixos do elemento principalmente nas folhas mais novas (QUAGGIO et al., 1996). Outro trabalho demonstrou que plantas de mamona sob deficiência de B apresentaram internódios curtos, enrugamento e enrolamento do limbo foliar, além de necrose de

racemos primários (PAULO et al., 1989). Na cultura da soja foram observados caule espesso, baixo índice de pegamento de flores, morte da gema apical, formação de pequenas folhas e superbrotamento (MASCARENHAS et al., 1988). Mascarenhas et al. (1998) observaram que sintomas de deficiência de B em feijoeiro foram caracterizados por encurtamento de internódios e engrossamento do caule.

Em feijoeiro, a utilização de doses crescentes de B reduziu o "stand" de plantas e o rendimento de grãos em condições de campo, afetando ainda a germinação das sementes, onde se ressaltou neste aspecto o cuidado com a adubação boratada e a quantidade de B disponível no solo antes da fertilização (SILVEIRA et al., 1996). Mariano et al. (1999), medindo o número de grãos/vagem, número de vagem/planta e peso de cem grãos na mesma cultura, constataram influência significativa e positiva de doses crescentes do micronutriente. Lima et al. (1999) não identificaram respostas nestes parâmetros, porém resultados positivos foram encontrados por Bevilaqua et al. (2002) investigando cultivares de soja.

Na cultura do melão, decréscimos na produção de matéria seca da parte aérea e de frutos, sendo mais pronunciados nestes últimos, foram visualizados no segundo ano de cultivo, com o aumento da quantidade de B extraído no solo (GOLDBERG et al., 2003). Torun et al. (2003), utilizando diferentes cultivares de cevada, identificaram que as mais sensíveis e com sintomas mais acentuados de toxicidade, demonstraram o pior desempenho na produção de grãos e peso seco da parte aérea em condições de excesso de B (6 e 18 mg kg⁻¹). Em outro solo com 0,5 mg kg⁻¹ de B, a produção de grãos foi superior comparada às cultivares tolerantes de cevada. Aspaslan; Gunes (2001) verificaram toxicidade de B de forma mais severa em tomate em tratamentos com 10 e 20 mg kg⁻¹ de B, enquanto que pepino não apresentou tolerância à última dose.

A deficiência do B nas plantas segundo Ferreira et al. (2001a) geralmente apresenta-se nas folhas mais novas, caracterizando-se por manchas brancas irregulares entre as nervuras. Quanto à toxicidade, há o surgimento de clorose, queimaduras e/ou sinais necróticos nas margens e extremidades das folhas mais velhas (NABLE et al., 1997).

Outro fator a considerar no que diz respeito à ideal nutrição de B da planta é a acurácia na determinação dos teores do micronutriente no material vegetal. De forma geral, a determinação do teor de boro no tecido vegetal por via úmida é condenável

devido a perda de ácido bórico, um problema contornado pelo uso da via seca (FERREIRA et al., 2001a).

2.2. Reação do Boro no solo

A capacidade do solo de reter nutrientes está relacionada à sua composição mineralógica e ao teor de matéria orgânica. As pesquisas procuram esclarecer reações e processos envolvidos no fluxo de elementos entre as fases sólida e líquida, sendo que nesta questão inclui-se o B, presente nos constituintes orgânicos- fonte principal- e inorgânicos (ROCHA, 1995), destacando-se nestes últimos a turmalina, um mineral de baixa solubilidade.

Nos solos, o B pode estar na estrutura molecular como ácido bórico- mais freqüente em condições ácidas- e iônica como boratos (FERREIRA H.; SILVA, 1999). Ambas as formas são influenciadas pelo processo de adsorção, resultante da interação com os minerais e a matéria orgânica (VIEZZER et al., 1995; ALLEONI et al., 1999) e, outros elementos do solo, como zinco (KRISHNASAMY; MATHAN, 2001), refletindo na sua disponibilidade. Entre os minerais, os picos de adsorção máxima encontrados para óxidos de Fe, de Al e caulinita ficaram em torno de pH 7-8, enquanto para argilas 2:1 este valor se situa entre 9-10 (GOLDBERG, 1999). Óxidos de Al amorfos alcançam picos de adsorção em pH 6-7 (GOLDBERG; GLAUBIG, 1985). Goldberg; Forster (1991) destacam ainda as calcitas, que em pH elevado têm um papel importante, pois são materiais expressivos na adsorção de boro, principalmente em solos com teores elevados destes minerais, nos quais atenuam a ação tóxica do elemento. O aumento na energia de adsorção decorrente da calagem também provoca maior retenção de B, como constataram Alleoni; Camargo (1998a), nas camadas superficiais de cinco classes distintas de solos.

A matéria orgânica do solo possui um papel fundamental na disponibilidade de B. Componentes orgânicos resistentes à decomposição, como os ácidos fúlvicos e húmicos contribuem na retenção do micronutriente. Por exemplo, Meyer; Bloom (1997) encontraram aumento na adsorção de B em ácidos húmicos com a elevação do pH, alcançando maiores valores nos níveis alcalinos máximos utilizados (pH 8,15 e 8,17). Gu; Lowe (1990) observaram que concentrações de B entre 0 e 80 mg dm⁻³ adicionados em ácidos húmicos, extraídos de três solos distintos, resultaram na maior

retenção do elemento em pH elevado (8,8), não sendo esta retenção expressiva em pH abaixo de 6,5.

Quanto à quantificação de B disponível em solos, deve-se considerar a capacidade de extração das diferentes soluções utilizadas e suas correlações com os atributos dos solos. De forma geral, há uma maior correlação com a água quente (BATAGLIA; RAIJ, 1990; OLIVEIRA et al., 1999) na maioria dos estudos, contudo se ressalta o uso de outros extratores como cloretos de cálcio e bário, apontados em trabalhos isolados como eficientes na predição de B disponível (FERREIRA et al., 2001b; TANIGUCHI et al., 2003).

Muitos trabalhos também identificam a diversidade dos teores de B disponíveis em solos, de acordo com as condições de cada local. Utilizando água quente, Horowitz; Dantas (1973) identificaram valores de 0,58 a 4,34 mg kg⁻¹ de B nas camadas superficiais de solos da Zona da Mata e Litoral de Pernambuco, Ryan et al. (1998) de 6 mg dm⁻³ e 20 mg dm⁻³ em horizontes subsuperficiais de diferentes perfis de uma pequena área na Síria, enquanto que em trabalhos de fracionamento em diferentes solos Hou et al. (1996) identificaram B disponível com água quente variando entre 8,9 e 163,2 mg kg⁻¹, Ferreyra H.; Silva (1999) de 0,08 a 0,74 mg kg⁻¹ extraído com água e cloreto de cálcio, Xu et al. (2001) com cloreto de cálcio de 0,02 a 0,26 mg kg⁻¹, Raza et al. (2002) entre 0,03 a 3,75 mg kg⁻¹ com quatro extratores e, Chaudhary; Shukla (2004) de 0,16 a 1,79 mg kg⁻¹ com água quente e cloreto de cálcio, comparando sete soluções extratoras diferentes. Esses resultados alertam ainda para as diferenças edafoclimáticas das regiões, onde se deve caracterizar a quantidade de B disponível existente e estudar o comportamento do solo após a adubação boratada em cada local, evitando generalizar e utilizar informações obtidas em áreas e casos distintos.

São poucos os trabalhos publicados que abrangem, discutem e associam fatores referentes à otimização da adubação boratada via solo, relevando as faixas ideais de suprimento, de forma a evitar escassez ou excesso do nutriente. Alguns deles conseguiram identificar a influência na disponibilidade do micronutriente promovidas por alterações químicas através de práticas tradicionais, como a calagem em solos ácidos, e determinar os níveis críticos para algumas espécies agrícolas, baseando-se em atributos como pH, argila e matéria orgânica. Nestes aspectos, Carpentieri-Pípolo et al. (1999) averiguando a interação B e calcário no crescimento e produção da matéria seca

de girassol em um solo, encontraram como dose mais eficiente 1 t ha^{-1} (de calcário), a qual propiciou maior absorção do elemento. Alleoni et al. (1998 b), estudando a capacidade de retenção de B em três solos, constataram maior adsorção após a calagem. Em relação aos teores adequados e tóxicos, Buzetti et al. (1990 a) detectaram no solo níveis críticos entre $0,11$ e $0,23\text{ mg dm}^{-3}$ de B usando duas doses de calcário na produção de matéria seca e grãos de soja, enquanto Fageria (2000) trabalhando com cinco espécies encontrou maior toxicidade para soja em torno de $5,2\text{ mg kg}^{-1}$ de B e, para o milho, de $5,7\text{ mg kg}^{-1}$ do micronutriente. Mariano et al. (2000), avaliando a produção de feijão em quatro classes de solo, identificaram nível crítico e tóxico variando entre $0,57$ e $1,87\text{ mg dm}^{-3}$ e $1,89$ e $4,65\text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente.

O objetivo do presente estudo foi avaliar possíveis sintomas de deficiência e toxicidade de B em milho; identificar os níveis críticos no solo e na planta e de toxicidade na planta; relacionar a produção de matéria seca e disponibilidade do B com características químicas e físicas dos solos; e, determinar o extrator mais adequado para a avaliação da disponibilidade do elemento em solos de Pernambuco.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas dez classes de solos (Quadro 1) em duas regiões fisiográficas do estado de Pernambuco (Zona da Mata e Agreste), considerando os diferentes teores de argila e matéria orgânica. Posteriormente, procedeu-se a identificação dos pontos com GPS e a coleta da camada superficial (0-20cm), obtidas a TFSA, passando o material em peneira de 2mm. Em seguida, realizou-se a caracterização química e física (Quadro 2) segundo EMBRAPA (1997). O fracionamento da matéria orgânica foi efetuado de acordo com Stevenson (1994).

Seqüencialmente foi realizada a calagem (exceto no Gleissolo e Planossolo Háplico), com uma mistura de carbonatos de cálcio e de magnésio em uma relação 3:1, em $3,3\text{ dm}^3$ dos solos, segundo a recomendação da Comissão Estadual de Fertilidade do Solo do Estado de Pernambuco (1998). Após quinze dias de incubação com os carbonatos, foram aplicados aos solos cinco doses de B ($0,0$; $2,0$; $4,0$; $6,0$ e $12,0\text{ mg dm}^{-3}$) segundo fontes bibliográficas (FAGERIA, 2000; MARIANO et al., 1999 e 2000), utilizando como fonte o ácido bórico, seguindo-se novo período de incubação por

30 dias. Os solos foram mantidos a 80% da capacidade de campo, diariamente. Após a incubação, coletou-se 0,3 dm³ de solo para análise do B disponível mediante três extratores (Mehlich-1, ácido clorídrico 0,05 mol L⁻¹ e água quente). Os 3,0 dm³ que restaram foram acondicionados em vasos impermeabilizados de 4,5 dm³ e colocados em casa de vegetação. Para a semeadura foram adicionadas cinco sementes de milho por vaso da variedade AG1051. O desbaste aconteceu seis dias após a germinação, deixando-se 2 plantas por vaso.

Quadro 1. Classes de solos selecionadas nas regiões fisiográficas do estado de Pernambuco

LOCALIZAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO ⁽¹⁾	COORDENADAS
-----ZONA DA MATA-----		
TIMBAÚBA	ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico típico A húmico	07° 25' 22" S 35° 10' 54" W
GOIANA	ESPODOSSOLO CÁRBICO Órtico duripânico arênico A moderado	07° 38' 26,2" S 34° 57' 04" W
RIO FORMOSO	LATOSSOLO AMARELO Coeso típico A moderado	08° 40' 27" S 35° 14' 20,7" W
CABO	NITOSSOLO VERMELHO Distroférico típico A moderado	08° 19' 13,1" S 35° 00' 31,6" W
IPOJUCA	GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico A moderado	08° 25' 16,0" S 35° 01' 14,9" W
-----AGRESTE-----		
SÃO CAETANO	PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico arênico solódico A moderado	08° 21' 36,5" S 36° 10' 19,9" W
IPA- CARUARU	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico A moderado	08° 13' 43,5" S 35° 54' 56,2" W
JATAÚBA	PLANOSSOLO NÁTRICO sálico típico A fraco	07° 58' 22,7" S 36° 31' 02,4" W
SERRA DOS CAVALOS- CARUARU	LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico húmico	08° 22' 23,5" S 36° 01' 48,1" W
GARANHUNS	ARGISSOLO AMARELO Distrófico abrupto fragipânico A húmico	08° 58' 47,2" S 36° 31' 30,1" W

Quadro 2. Atributos químicos e físicos dos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco

ATRIBUTO ^(a)	PVAd	Eko	LAX	NVdf	GXve	SXe	RRd	SNz	LVAd	PAd
pH _{água}	5,2	5,1	4,4	5,5	5,8	6,4	4,6	6,4	3,9	4,5
pH _{após calagem}	4,7	6,2	5,1	5,2	5,8	5,8	5,2	5,8	5,3	5,3
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,05	0,50	1,68	2,80	8,82	1,67	1,72	1,87	0,33	1,38
Mg (cmol _c dm ⁻³)	2,77	0,05	2,02	2,95	5,85	0,56	0,58	2,58	0,00	0,37
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,10	0,58	0,50	0,08	0,00	0,00	0,95	0,05	2,10	1,10
H ⁺ + Al ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	10,20	4,97	7,88	5,68	5,38	1,06	6,24	1,64	10,55	11,71
K (cmol _c dm ⁻³)	0,02	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
C (g kg ⁻¹)	27,86	6,74	22,20	13,97	15,08	4,76	13,12	3,41	22,68	20,19
Ac. Fúlvico (g kg ⁻¹)	3,05	0,98	2,15	1,38	0,82	0,51	1,88	0,42	4,56	3,56
Ac. Húmico (g kg ⁻¹)	3,95	0,90	1,57	1,08	1,21	0,73	2,08	0,20	2,03	3,32
Humina (g kg ⁻¹)	5,58	2,00	4,52	3,36	4,25	1,52	2,52	0,75	3,57	2,50
N (g kg ⁻¹)	1,18	0,17	0,77	0,61	0,54	0,17	0,54	0,07	0,91	0,64
Relação C/N	23,68	39,28	28,66	23,02	27,92	27,78	24,29	47,98	24,97	31,52
B (mg kg ⁻¹)	0,28	0,28	0,65	0,19	0,65	0,65	0,65	0,75	1,20	1,57
Fe (mg kg ⁻¹)	344,35	60,81	640,65	898,39	372,58	19,68	34,19	26,13	841,94	608,06
Cu (mg kg ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn (mg kg ⁻¹)	22,62	0,00	0,00	37,06	52,76	5,83	52,76	25,51	0,00	0,00
D _s (g cm ⁻³)	1,00	1,52	1,06	1,15	1,17	1,66	1,35	1,55	1,02	1,27
D _p (g cm ⁻³)	2,48	2,64	2,47	2,66	2,46	2,62	2,49	2,62	2,43	2,62
Argila (g kg ⁻¹)	294,78	78,13	479,88	493,10	536,47	79,80	164,91	91,45	317,19	193,12
Silte (g kg ⁻¹)	138,36	35,06	64,17	133,91	91,45	93,33	151,92	258,30	56,33	76,66
Areia (g kg ⁻¹)	566,86	886,81	455,95	372,99	372,08	826,87	683,16	650,25	626,48	730,22
θ _{mcc} (%)	22,50	6,43	24,09	24,38	23,17	5,95	10,58	9,90	23,15	17,53

^(a) Média de três réplicas. Solos: PVAd- ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; 2- EKO- ESPODOSSOLO CÁRBICO Órtico; LAX- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; GXve- GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico; SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; RRd- NEOSSOLO REGULÍTICO Distrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sáfico; LVAd- LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

A adubação foi parcelada aos 7 dias e 15 dias após a germinação, aplicando-se em cada vaso, as seguintes doses de nutrientes: 50 mg dm⁻³ de N (KNO₃ e (NH₄)₂SO₄), 150 mg dm⁻³ de K (KNO₃ e K₂SO₄), 400 mg dm⁻³ de P ((NH₄)₂HPO₄, KH₂PO₄ e CaHPO₄), 40 mg dm⁻³ de S (K₂SO₄ e (NH₄)₂SO₄), 3,664 mg dm⁻³ de Mn (MnCl₂ 4H₂O), 4 mg dm⁻³ de Zn (ZnSO₄ 7 H₂O), 1,329 mg dm⁻³ de Cu (CuSO₄), 1,556 mg dm⁻³ de Fe (FeSO₄ 7H₂O) e 0,15 mg dm⁻³ de Mo (Na₂MoO₄ 2H₂O). Os vasos foram regados duas vezes ao dia, mantendo os solos a aproximadamente 80% da capacidade

de retenção de umidade, através de pesagens e reposição da água perdida por evapotranspiração.

Aos 40 dias de crescimento a parte aérea das plantas foi coletada, seca em estufa a 65-75°C por 72 horas, pesada e moída para análise de B segundo Bataglia (1983).

Durante o crescimento das plantas foram observados possíveis sintomas de toxicidade do elemento.

O teor de B nos solos foi determinado como descrito abaixo.

Água Quente (SILVA; FERREYRA, 1998b)- Foram pesados 20 g de solo em um erlenmeyer, em seguida adicionou-se 40 mL de água destilada, sendo aquecido o conjunto em placa aquecedora, após cinco minutos da ebulição deixou-se esfriar. Foram acrescentadas três gotas de CaCl_2 0,1 mol L^{-1} e carvão ativo, agitou-se o material e filtrou-se para posterior dosagem.

Ácido Clorídrico 0,05 mol L^{-1} (SILVA; FERREYRA, 1998b)- Pesou-se 10 g de solo em um recipiente de plástico, adicionaram 20 mL da solução, agitou posteriormente por 5 minutos com carvão ativo, e procedeu a filtração.

Mehlich-1 (SILVA; FERREYRA, 1998b)- Pesou-se 10 g de solo em um recipiente de plástico e adicionaram-se 20 mL da solução, seguido de quinze minutos de agitação com carvão ativo e filtragem.

A dosagem de B foi efetuada pelo método colorimétrico com o reagente azometina-H (WOLF, 1971 e 1974).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, segundo esquema fatorial 5 x 10 (doses x solos), com três repetições. Os resultados obtidos foram submetidos às análises da variância, regressão e, correlação com os atributos dos solos, para se avaliar os efeitos dos tratamentos. Os níveis críticos e tóxicos de B na planta foram determinados por meio de equações de regressão que estimaram 90% e 95% da produção máxima de matéria seca e, redução de 10% desta a partir da dose máxima, relacionando também teor e conteúdo de B na parte aérea em função das doses aplicadas. Nos solos estes níveis foram determinados de forma similar, através de equações de regressão estimando o teor de B no solo, recuperado pelos extratores em resposta às doses de B aplicadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Produção de matéria seca de milho em resposta a doses crescentes de B

Houve efeito significativo (1% de probabilidade) da produção de matéria seca do milho em relação à interação doses de B aplicadas e solos (Quadro 3). Entre os solos (Quadro 4), o Argissolo Vermelho-Amarelo e o Latossolo Vermelho-Amarelo apresentaram as maiores produções de matéria seca, variando de 24,39 g vaso⁻¹ a 27,89 g vaso⁻¹. Em contrapartida, os valores mais baixos foram obtidos para o Planossolo Háptico e Planossolo Nátrico, sendo na última dose (12 mg dm⁻³) as menores produções, 3,47 g vaso⁻¹ e 4,67 g vaso⁻¹, respectivamente. Fageria (2000) também obteve resposta para milho aplicando 7 doses de B, porém Jahiruddin et al. (2001) não detectaram influência do B usando a dose de 2,5 mg kg⁻¹ na produção de matéria seca de soja e milho em dois solos submetidos à adubação química ou orgânica, devido ao teor originalmente alto de B do solo.

Quadro 3. Resumo da análise da variância da matéria seca da parte aérea vs doses de B (mg dm⁻³) aplicadas a solos de Pernambuco

FV	GL	SQ	QM	F	SIG.
Total	149	8500,370			
Total de Redução	51	8306,414	162,871	82,29	0,000
Dose	4	32,260	8,065	4,07	0,004
Solo	9	8122,797	902,533	456,02	0,000
Bloco	2	0,337	0,169	0,09	*****
Dose*Solo	36	151,020	4,195	2,12	0,002
Resíduo	98	193,956	1,979		

Número de dados= 150

Média geral= 16,421

C. V.= 8,567

O pH (Quadro 2), após a incubação, variou da faixa ácida (4,7) à levemente neutra (6,2), valores estes abaixo do pico de adsorção de B pelos constituintes do solo segundo estudos (GOLDBERG; GLAUBIG, 1985; GU; LOWE, 1990; GOLDBERG; FORESTER, 1991; MEYER; BLOOM, 1997; GOLDBERG, 1999). Portanto, ocorreu possivelmente maior disponibilidade do micronutriente à absorção pelas plantas no

presente trabalho, baseado na predominância da forma H_3BO_3 em pH abaixo de 7,0 (AZEVEDO et al., 2001), forma preferencial de B absorvível. Por outro lado, deve-se considerar a influência dos teores elevados de matéria orgânica na maioria dos solos estudados na produção de matéria seca, sobre a indisponibilidade de B, obtendo os maiores valores de produção, válida ainda a afirmação inversa aos de baixa eficiência (de produção), onde houve maior disponibilidade de B. Neste sentido, Valladares et al. (1998) citaram a formação de complexos boratidol, a partir da ligação do ânion fosfato aos compostos orgânicos, estudando a adsorção em solos ácidos enquanto Parks; White (1952) relatam a adsorção de B em grandes quantidades nos H^+ de ácidos húmicos em pH ácido, reduzindo a atuação do micronutriente nos solos.

Quadro 4. Produção de matéria seca da parte aérea de milho ($g\ vaso^{-1}$) sob diferentes doses de B em solos do estado de Pernambuco

SOLO	DOSE ($mg\ dm^{-3}$)				
	0	2	4	6	12
PVAd	25,34	24,39	25,66	26,83	27,89
EKo	10,19	10,02	10,54	8,38	8,96
LAX	13,38	15,25	14,90	14,79	12,21
NVdf	19,07	19,80	20,52	20,51	20,82
GXve	22,78	21,59	21,24	22,40	20,62
SXe	3,52	3,54	4,87	4,37	3,47
RRd	15,37	16,57	15,18	12,69	12,29
SNz	6,22	8,82	8,70	9,13	4,67
LVAd	27,38	26,72	27,48	24,76	26,49
PAd	19,83	20,33	20,90	20,95	18,76

Solos: PVAd- ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; 2- EKo- ESPODOSSOLO CARBICO Órtico; LAX- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; GXve- GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico; SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; RRd- NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sáfico; LVAd- LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

O teor de argila (Quadro 2) assim como o pH dos solos após incubação se destacou no desenvolvimento do milho. Representando uma característica associada à disponibilidade de boro (FERREIRA et al., 2001b; ALLEONI et al., 1999; GOLDBERG et al., 2002) em grande parte das pesquisas, verifica-se que entre os dez solos utilizados no presente estudo, aqueles com menores teores de argila apresentaram baixos

valores de produção de matéria seca. Na produção (de matéria seca) é válido ressaltar ainda os teores de argila juntamente com a matéria orgânica influenciando na disponibilidade de B para as plantas. Dentre os constituintes mineralógicos, Azevedo et al. (2001) ressaltam a presença da caulinita, apresentando uma adsorção específica de B. Embora seja um argilomineral de menor superfície específica, há de se destacar a importância quantitativa deste material em solos altamente intemperizados.

No Quadro 5 são representados os teores de B recuperado pelos três extratores estudados. As maiores extrações em ordem decrescente ocorreram no Latossolo Vermelho-Amarelo > Argissolo Amarelo > Neossolo, variando de $0,14 \text{ mg kg}^{-1}$ (dose 0 mg dm^{-3}) a $8,73 \text{ mg kg}^{-1}$ (dose 12 mg dm^{-3}). Considerando os resultados de cada extrator utilizado, verificou-se a recuperação semelhante do micronutriente entre o Mehlich-1 e o ácido clorídrico $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, para as doses de B aplicadas. Os três extratores no Espodossolo, Nitossolo e Gleissolo recuperaram teores estatisticamente iguais de B. Na maioria dos casos, os valores mais elevados de B recuperado foram obtidos pelo método da água quente, enquanto os menores, para o ácido clorídrico.

A disponibilidade de B pode estar relacionada a alguns fatores como a mineralização da matéria orgânica durante o tempo de incubação, grande poder de extração por parte dos reagentes ácidos e até interferências pelo tempo de aquecimento com a água quente. Além destes (fatores) considera-se ainda a textura, arenosa em alguns solos e o tipo de mineral de argila presente (nos solos).

Chaudhary; Shukla (2004) também obtiveram maiores extrações com água quente entre sete extratores utilizados, onde destacaram ainda a obtenção de B disponível ligado a colóides minerais e orgânicos e, a variabilidade dos dados promovida pelo método da água quente, representada no controle do tempo de extração. Mylavarapu et al. (2002) comparando os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 constataram a superioridade de extração do segundo (da ordem de 111%), atribuída à presença de EDTA neste extrator.

Quadro 5. Teores de B recuperado pelos extratores nos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco

EXTRATOR	Dose de B (mg dm ⁻³)				
	0	2	4	6	12
PVA _d					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,09	0,78	1,39	1,82	4,59
HCl 0,05 mol L ⁻¹	0,76	0,93	1,18	1,36	2,91
Água Quente	0,36	1,30	2,01	2,80	4,85
EKO					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,33	1,13	1,93	2,73	5,37
HCl 0,05 mol L ⁻¹	0,46	1,13	1,51	2,27	4,26
Água Quente	0,30	1,34	2,00	3,14	6,07
LAX					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,24	0,79	1,41	1,65	2,90
HCl 0,05 mol L ⁻¹	1,18	1,39	1,71	2,56	4,36
Água Quente	1,32	1,60	2,73	3,69	6,69
NV _{df}					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,64	0,90	1,77	2,02	4,09
HCl 0,05 mol L ⁻¹	0,23	1,09	1,60	2,03	4,59
Água Quente	0,41	1,16	1,91	2,89	5,23
GX _{ve}					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,70	1,18	1,58	2,47	4,55
HCl 0,05 mol L ⁻¹	0,32	0,79	1,53	1,81	4,44
Água Quente	0,07	0,65	1,51	2,52	5,40

Solos: PVA_d- ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; 2- EKO- ESPODOSSOLO CÁRBICO Órtico; LAX- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NV_{df}- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; GX_{ve}- GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico

Continuação...

EXTRATOR	Dose de B (mg dm ⁻³)				
	0	2	4	6	12
SXe					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,39	0,46	0,96	1,72	4,41
HCl 0,05 mol L ⁻¹	0,69	1,76	2,29	3,04	5,80
Água Quente	0,95	1,99	2,57	3,49	4,87
RRd					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,14	0,67	1,30	2,45	4,42
HCl 0,05 mol L ⁻¹	2,05	2,79	3,65	4,02	6,95
Água Quente	2,04	2,57	3,76	5,46	7,70
SNz					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	0,05	0,91	2,15	2,34	4,33
HCl 0,05 mol L ⁻¹	0,31	0,40	1,28	1,90	3,48
Água Quente	0,42	0,73	0,96	1,27	2,59
LVAd					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	1,50	2,33	3,05	3,89	7,73
HCl 0,05 mol L ⁻¹	1,69	1,79	1,99	2,79	4,98
Água Quente	3,37	4,26	5,16	6,65	8,73
PAd					
-----mg kg ⁻¹ -----					
Mehlich-1	2,95	3,40	3,86	4,43	6,60
HCl 0,05 mol L ⁻¹	1,91	2,18	2,31	3,10	5,33
Água Quente	1,15	1,72	2,55	3,63	5,94

Solos: SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; RRd- NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sáfico; LVAd- LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

O milho cultivado no Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo, Latossolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Amarelo acumulou as maiores concentrações de B na parte aérea, principalmente na última dose (Quadro 6). Porém, devido à maior disponibilidade de B relacionada à textura arenosa e/ou baixo teor de matéria orgânica (Quadro 2), o Planossolo Háplico, Planossolo Nátrico e o Neossolo exibiram sintomas mais nítidos de toxicidade do micronutriente. As plantas de milho (nestes solos),

apresentaram estes sintomas de forma mais acentuada principalmente nas doses 6 e 12 mg dm⁻³. Assim, de forma geral, as folhas mais velhas do milho apresentaram manchas marron necróticas nas margens (Fotos 1 a 3), estendendo-se estes indícios de toxicidade às folhas mais novas com o desenvolvimento do milho. As plantas no Espodossolo, Latossolo Amarelo e Neossolo, além dos Planossolos (com maior comprometimento na produção) exibiram ainda nas duas últimas doses de B aplicadas, caules bastante delgados em comparação às plantas dos demais solos. Outros estudos enumeraram sintomas semelhantes de toxicidade de B, como aqueles que ocorreram no tomate a partir da concentração 4 mg dm⁻³ de B aplicado no solo (BEN-GAL; SHANI, 2002), em melão (GOLDBERG et al., 2002), cevada (TORUN et al., 2003), pepino (ASPASLAN; GUNES, 2001) e, ainda, com quatro cultivares de soja utilizando solução nutritiva, onde o excesso do micronutriente causou clorose evoluindo para necrose nas folhas mais velhas (FURLANI et al., 2001).

Quadro 6. B na parte aérea de milho com a aplicação das doses 0 a 12 mg dm⁻³ nos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco

SOLO	B na parte aérea (mg vaso ⁻¹)				
	0	2	4	6	12
PVAd	0,44	0,61	0,72	0,80	2,12
EKo	0,22	0,42	0,65	0,82	1,10
LAX	0,18	0,24	0,28	0,43	1,14
NVdf	0,09	0,10	0,21	0,32	0,58
GXve	0,24	0,36	0,41	0,47	0,50
SXe	0,11	0,27	0,73	0,71	1,66
RRd	1,02	1,35	1,20	1,79	2,77
SNz	0,16	0,16	0,60	0,63	1,53
LVAAd	1,57	1,81	1,54	2,21	5,84
PAd	0,71	0,71	1,68	1,62	3,35

Solos: PVAd- ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; 2- EKo- ESPODOSSOLO CARBICO Órtico; LAX- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; GXve- GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico; SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; RRd- NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sáfico; LVAAd- LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

No Quadro 7 constam as correlações entre B disponível recuperado pelos extratores e características dos solos e da planta. Observou-se maior coeficiente de

correlação entre os extratores e o teor de B na planta para o HCl 0,05 mol L⁻¹. Este extrator, porém apresentou a menor correlação com o B na parte aérea. O Mehlich-1 foi o segundo extrator em maior correlação com o teor de B na parte aérea do milho (0,55), sendo semelhante este resultado àquele encontrado por Bataglia; Raij (1989) no teor de B do girassol (0,52). Nesse mesmo estudo, os coeficientes com o uso da água quente, no mesmo parâmetro para as culturas utilizadas foram de 0,78 (girassol) e 0,40 (sorgo). A correlação entre o teor de B no girassol e o B no solo recuperado pelo Mehlich-1 e pela água quente foram de 0,63 e 0,78, respectivamente, enquanto o B na parte aérea para o Mehlich-1 foi igual ao presente estudo (0,73), segundo outro trabalho de Bataglia; Raij (1990), onde ressaltaram também a não discriminação deste extrator a teores baixos do micronutriente.

Quadro 7. Coeficientes de correlação linear simples entre B recuperado (mg kg⁻¹) pelos extratores e características da planta e dos solos de Pernambuco utilizados no ensaio

Características	Extratores		
	Mehlich-1	HCl 0,05 mol L ⁻¹	Água Quente
Teor planta (mg kg ⁻¹)	0,55***	0,70***	0,51***
Mat. seca (g vaso ⁻¹)	0,19 ⁰	ns	ns
B na parte aérea (mg vaso ⁻¹)	0,73***	0,69***	0,71***
Carbono (g kg ⁻¹)	Ns	0,61***	0,43***
Mat. Orgânica (g kg ⁻¹)	Ns	0,61***	0,44***
Argila (g kg ⁻¹)	-0,42**	ns	0,39**
Ác. Fúlvico (g kg ⁻¹)	0,30*	-0,46***	0,34**
Ác. Húmico (g kg ⁻¹)	Ns	-0,52***	0,27*

***, **, *, 0 e ns- Significativos a 0,1%, 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

Nos atributos dos solos, o HCl 0,05 mol L⁻¹ apresentou as melhores correlações com o carbono, matéria orgânica, ácidos fúlvicos e húmicos. Vale ressaltar que os coeficientes positivos dos extratores com a matéria orgânica estão associados à menor atuação no processo de adsorção de B no pH ácido. Por outro lado, os ácidos fúlvicos e húmicos apresentaram coeficientes de correlação negativos e altamente significativos no HCl 0,05 mol L⁻¹. Há de se considerar também que estas frações da matéria orgânica humificada podem ter um papel importante na adsorção de B mesmo em pH ácido (PARKS; WHITE, 1952), através da ligação do micronutriente aos grupos

carboxílicos dos ácidos do húmus (GU; LOWE, 1990). Quanto a argila, apenas o Mehlich-1 apresentou coeficiente negativo, indicando o efeito de menor disponibilidade de B com o aumento deste atributo. Para a água quente, o coeficiente positivo com esta característica pode ser explicado pela interferência por parte do tempo de extração (CHAUDHARY; SHUKLA, 2004).

O quadro 8 apresenta os coeficientes de correlação entre B na parte aérea do milho e as características da planta e dos solos. Verifica-se resultados altamente significativos para a matéria seca, B na parte aérea, carbono, matéria orgânica e argila. Entre os valores mais negativos dos atributos dos solos constata-se a argila, fator que esteve associado ao desempenho na produção de matéria seca principalmente no Gleissolo e Nitossolo, com os mais altos teores deste atributo, onde se pode atribuir à fração mineralógica maior atuação na indisponibilidade de B às plantas.

Quadro 8. Coeficientes de correlação linear simples entre teor de B na parte aérea do milho (mg kg^{-1}) e características da planta e dos solos de Pernambuco utilizados no ensaio

Características	Teor de B na parte aérea
Mat. seca (g vaso^{-1})	-0,38***
B na parte aérea (mg vaso^{-1})	0,57***
Carbono (g kg^{-1})	-0,29***
Mat. Orgânica (g kg^{-1})	-0,29***
Argila (g kg^{-1})	-0,45***
Ác. Fúlvico (g kg^{-1})	ns
Ác. Húmico (g kg^{-1})	-0,12 ⁰

***, 0 e ns- Significativos a 0,1%, 10% e não significativo, respectivamente.



Foto 1. Plantas de milho com 17 dias de cultivo no Planossolo Háplico apresentando toxicidade de B na dose 12 mg dm^{-3} .



Foto 2. Plantas de milho com 32 dias de cultivo no Latossolo Vermelho-Amarelo, apresentando manchas necróticas nas margens das folhas na dose 12 mg dm^{-3} de B.



(a)



(b)

Foto 3. Plantas de milho com 24 dias no (a) Planossolo Háplico e (b) Planossolo Nátrico, apresentando sintomas de toxicidade de B na dose 12 mg dm^{-3} .

4.2. Níveis Críticos e Tóxicos

A produção de matéria seca foi significativamente afetada pelas doses de B em 5 dos 10 solos estudados. Houve um melhor ajuste ao modelo quadrático no Nitossolo, Planossolo Háplico, Planossolo Nátrico e Argissolo Amarelo, enquanto o Latossolo Amarelo apresentou melhor ajuste à equação quadrática com base raiz quadrada (Quadro 9). A baixa resposta de culturas a doses de B em solos tem sido relatada em outros trabalhos. Por exemplo, Fageria (2000) aplicando doses crescentes de B em um

Latossolo obteve apenas para o arroz, entre as culturas utilizadas, um ajuste quadrático dos dados na relação matéria seca da parte aérea e doses de boro. Enquanto que, Buzetti et al. (1990a) com cinco doses de B, não conseguiram um ajuste dos dados no último nível de acidez a nenhuma equação estatística, na produção de grãos de soja.

Quadro 9. Equações de regressão ajustadas entre a produção de matéria seca da parte aérea de milho (g vaso^{-1}) como variável dependente das doses de B aplicadas (mg dm^{-3}) aos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco

SOLO	EQUAÇÃO	R ²
Lax	$Y = -0,805 \text{ **}x + 2,467 \text{ **}x^{0,5} + 13,367$	0,99*
NVdf	$Y = -0,020 \text{ *}x^2 + 0,384 \text{ *}x + 19,109$	0,96*
Sxe	$Y = -0,031 \text{ }^0x^2 + 0,381 \text{ }^0x + 3,366$	0,69 ^{ns}
SNz	$Y = -0,100 \text{ *}x^2 + 1,043 \text{ *}x + 6,497$	0,96*
Pad	$Y = -0,045 \text{ **}x^2 + 0,462 \text{ **}x + 19,747$	0,99*

** , * , 0 e ns Significativos a 1% e 5%, 10% e não significativo respectivamente. Solos: Lax- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférrico; SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

Em decorrência do efeito significativo de doses de B sobre a produção de matéria seca, a identificação dos níveis críticos e tóxicos foi possível em dois solos da Zona da Mata e três do Agreste. No Quadro 10 encontram-se os níveis críticos (90% e 95% da produção máxima) e tóxicos (10% da redução da produção máxima) nos solos estudados, obtidos a partir das equações que estimam o B recuperado por cada extrator em função das doses aplicadas (Quadro 11). Verifica-se que os teores críticos de B variaram entre $0,36 \text{ mg kg}^{-1}$ e $2,34 \text{ mg kg}^{-1}$ independentemente do extrator, variando de $0,36$ a $1,40 \text{ mg kg}^{-1}$ no Mehlich-1, com o HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ de $0,75 \text{ mg kg}^{-1}$ a $2,15 \text{ mg kg}^{-1}$ e, pela água quente de $0,72 \text{ mg kg}^{-1}$ a $2,34 \text{ mg kg}^{-1}$ e que os maiores valores entre os solos foram encontrados para o Planossolo Háplico (água quente e HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$), Argissolo Amarelo (HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$) e Planossolo Nátrico (Mehlich-1). Estes resultados ficaram próximos daqueles encontrados por Mariano et al. (2000), onde os níveis críticos (90%) no Mehlich-1 e água quente estiveram entre $0,57$ e $1,04 \text{ mg dm}^{-3}$ no primeiro extrator e, $0,78 \text{ mg dm}^{-3}$ e $1,34 \text{ mg dm}^{-3}$, no segundo.

Quadro 10. Níveis críticos e tóxicos de B correspondentes a 95% e 90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea de milho (em g vaso⁻¹) e redução de 10% desta, estimados pelos extratores Mehlich-1, HCl 0,05 mol L⁻¹ e água quente em solos de Pernambuco

EXTRATOR	SOLO				
	LAx	NVdf	SXe	SNz	PAd
	-----mg kg ⁻¹ -----				
Meh-95%	0,425	1,145	0,998	1,356	0,390
Meh-90%	0,363	Nd	0,580	1,046	nd
Meh-10%	2,190	6,233	3,436	3,160	4,427
HCl- 95%	0,996	1,013	2,150	0,996	1,640
HCl- 90%	0,916	Nd	1,683	0,749	nd
HCl-10%	3,256	7,156	4,872	2,437	5,061
H ₂ O- 95%	1,108	1,299	2,339	0,881	1,152
H ₂ O- 90%	0,974	Nd	1,981	0,720	nd
H ₂ O- 10%	4,915	8,323	4,422	1,821	5,913

nd- não detectado. Solos: LAx- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sáfico; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

Fageria (2000) também identificou níveis críticos no solo com o extrator água quente semelhantes a este trabalho, destacando-se o milho (1,30 mg kg⁻¹), arroz e trigo (0,40 mg kg⁻¹). Contudo, teores críticos baixos em vinte e nove classes de solo de 0,45 mg kg⁻¹ na água quente e 0,56 mg kg⁻¹ para o HCl 0,05 mol L⁻¹ foram detectados em dois cultivos de girassol, utilizando duas doses de B, onde nesta investigação, apesar dos baixos valores, houve ainda a solubilização de B de frações e formas diferentes (SILVA; FERREYRA H., 1998a).

Quadro 11. Equações de regressão ajustadas entre o B recuperado pelos três extratores (Y em mg kg⁻¹) como variável dependente das doses de B aplicadas (X em mg dm⁻³) aos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco

SOLO	EQUAÇÃO	R ²
Mehlich-1		
Lax	Y= 0,217 ***x + 0,357	0,99***
NVdf	Y= 0,294 ***x + 0,476	0,98***
Sxe	Y= 0,373 ***x - 0,285	0,98**
SNz	Y= 0,367 ***x + 0,031	0,99***
Pad	Y= 0,348 ***x + 0,287	0,97**
HCl 0,05 mol L ⁻¹		
Lax	Y= 0,277 ***x + 0,909	0,97**
NVdf	Y= 0,354 ***x + 0,205	0,99***
Sxe	Y= 0,417 ***x + 0,718	0,99***
SNz	Y= 0,278 **x + 0,143	0,97**
Pad	Y= 0,295 **x + 1,553	0,95**
Água Quente		
Lax	Y= 0,467 ***x + 0,962	0,99***
NVdf	Y= 0,405 ***x + 0,375	0,99***
Sxe	Y= 0,319 ***x + 1,242	0,97**
SNz	Y= 0,181 ***x + 0,325	0,98***
Pad	Y= 0,410 ***x + 1,031	0,99***

***; ** Significativos a 0,1% e 1%, respectivamente. Solos: Lax- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; Sxe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sálido; Pad- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

Os níveis tóxicos variaram nos extratores de 1,82 mg kg⁻¹ a 8,32 mg kg⁻¹ (ambos extremos pela água quente). O HCl 0,05 mol L⁻¹ e a água quente apresentaram maiores valores em relação ao Mehlich-1 em grande parte dos solos. Estes valores foram próximos aos observados por Mariano et al. (2000) no Latossolo Amarelo, Planossolo Háplico e Planossolo Nátrico para o Mehlich-1. Os resultados dos níveis tóxicos do presente trabalho ainda foram semelhantes na maioria dos solos aos resultados de Fageria (2000) em um Latossolo, onde o boro extraído com água quente teve teores tóxicos no solo para o trigo e milho de 4,30 e 5,70 mg kg⁻¹, respectivamente. As diferenças apresentadas neste trabalho e nos outros estudos, nos níveis críticos e

tóxicos dos solos, podem ser devido a fatores como: classe e características dos solos, culturas, época do ano, idade da planta e coeficiente de utilização do micronutriente pela planta relacionado aos atributos dos solos (MARIANO et al., 2000).

Na planta, os níveis críticos e tóxicos (Quadro 12) obtidos pelas equações do Quadro 13 variaram entre 7,50 mg kg⁻¹ e 129,58 mg kg⁻¹ e, de 43,26 mg kg⁻¹ a 372,42 mg kg⁻¹, para o teor de B, respectivamente. O B na parte aérea do milho variou de 0,15 mg vaso⁻¹ a 0,59 mg vaso⁻¹ (críticos) e, 0,66 mg vaso⁻¹ a 3,23 mg vaso⁻¹ (tóxicos). Estes dados relacionam-se ao desenvolvimento da planta em cada solo, pois os maiores valores de B extraído pela planta, de forma geral, foram obtidos nos solos em que a produção de matéria seca foi menor. Isto pode ser explicado pelo efeito diluição e pela maior disponibilidade de boro em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica.

Quadro 12. Níveis críticos e tóxicos de B correspondentes a 95% e 90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea (em g vaso⁻¹) e redução de 10% desta, estimados pelos teores e conteúdos de B em milho

SOLO	NÍVEIS CRÍTICOS E TÓXICOS		
	90%	95%	10%
	Teor de B		
	-----mg kg ⁻¹ -----		
LAx	14,20	13,86	49,85
NVdf	nd	7,50	43,26
SXe	87,91	129,58	372,42
SNz	34,04	57,28	192,72
PAd	nd	25,96	168,99
	B na Parte Aérea		
	-----mg vaso ⁻¹ -----		
LAx	0,19	0,19	0,66
NVdf	nd	0,15	0,90
SXe	0,38	0,52	1,36
SNz	0,31	0,41	1,03
PAd	nd	0,59	3,23

nd- não detectado. Solos: LAx- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sáfico; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

Os dados encontrados para os níveis críticos do Nitossolo, Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo estão próximos dos valores considerados por Fageria et al. (1997) para o milho, no qual os teores críticos de B variam de 7 a 25 mg kg⁻¹. Buzetti et al. (1990b) identificaram nível crítico no feijão maior (56 mg kg⁻¹ de B), na produção de matéria seca, comparando ao tratamento onde se aplicou uma dose equivalente a 2 t de calcário (42 mg kg⁻¹ de B) em um Latossolo Vermelho-Escuro. À respeito do teor de B tóxico na parte aérea do milho, entre os solos apenas o Latossolo Amarelo (49,85 mg kg⁻¹) e o Nitossolo (43,26 mg kg⁻¹) apresentaram valores próximos ao encontrado por Fageria (2000) para esta cultura (68 mg kg⁻¹).

Quadro 13. Equações de regressão ajustadas entre o teor de B (Y em mg kg⁻¹) e B na parte aérea (Y em mg vaso⁻¹) como variável dependente das doses de B aplicadas (X em mg dm⁻³) aos solos da Zona da Mata e Agreste de Pernambuco

SOLO	EQUAÇÃO	R ²
Teor de B (mg kg ⁻¹)		
LAX	Y= 6,854 **x + 1,134	0,89*
NVdf	Y= 2,063 ***x + 2,790	0,97**
SXe	Y= 37,184 **x + 1,762	0,95**
SNz	Y= 26,103 **x - 22,971	0,87**
PAd	Y= 12,320 **x + 22,323	0,94**
B na parte aérea (mg vaso ⁻¹)		
LAX	Y= 0,082 **x + 0,060	0,92**
NVdf	Y= 0,044 ***x + 0,051	0,98**
SXe	Y= 0,129 **x + 0,079	0,97**
SNz	Y= 0,119 **x + 0,047	0,96**
PAd	Y= 0,227 **x + 0,523	0,95**

***, **, * e ⁰ Significativos a 0,1%, 1%, 5% e 10% respectivamente. Solos: LAX- LATOSSOLO AMARELO Coeso; NVdf- NITOSSOLO VERMELHO Distroférico; SXe- PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico; SNz- PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco; PAd- ARGISSOLO AMARELO Distrófico

5 CONCLUSÕES

A produção de matéria seca foi influenciada pelas doses de boro aplicadas em apenas 5 dos dez solos estudados, o que sugere baixo potencial de resposta à adubação com B para a maioria dos solos das regiões do Agreste e Zona da Mata de Pernambuco.

O extrator que obteve a melhor correlação com o teor de B na planta foi o HCl 0,05 mol L⁻¹, seguido do Mehlich-1 e pela água quente.

A obtenção dos níveis críticos e tóxicos nos solos e na planta foi possível em dois solos da Zona da Mata (Latosolo Amarelo e Nitossolo) e três do Agreste (Planossolo Háplico, Planossolo Nátrico e Argissolo Amarelo), devido ao menor ajuste dos dados da produção de matéria seca dos demais solos às equações matemáticas.

Os solos que apresentaram plantas com maior teor de B no tecido vegetal apresentaram sintomas mais graves de toxicidade, fator associado à maior disponibilidade de boro naqueles (solos) com textura mais arenosa e/ou baixos teores de matéria orgânica.

REFERÊNCIAS

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Energia livre da reação de adsorção de boro em solos. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 73, fasc. 3, p. 319-330, 1998 a.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C. Isotermas de Langmuir e de Freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, n. 3, p. 1-12, 1998 b.

ALLEONI, L. R. R.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A.S. Correlations between hot calcium chloride-extracted boron and chemical and physical attributes of some Brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, n. 2, p 295-300, 1999.

ASPASLAN, M.; GUNES, A. Interactive effects of boron and salinity stress on the growth, membrane permeability and mineral composition of tomato and cucumber plants. **Plant and Soil**, Wageningen, v. 236, n. 1, p. 123-128, 2001.

AZEVEDO, W. R. de; FAQUIN, V.; FERNANDES, L. A. Adsorção de boro em solos de várzea do Sul de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 7, p. 957-964, 2001.

BATAGLIA, O. C. et al. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48p. (Boletim técnico, 78).

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

BATAGLIA O. C.; RAIJ, B. V. Eficiência de extratores na determinação de boro em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 25-31, 1990.

BEN-GAL, A.; SHANI, U. Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity stress. **Plant and Soil**, Wageningen, v. 247, n. 2, p. 211-221, 2002.

BEVILAQUA, G. A. P.; FILHO, P. M. S.; POSSENTI, J. C. Aplicação foliar de cálcio e boro e componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 32, n. 1, p 31-34, 2002.

BUZETTI, S.; MURAOKA, T.; SÁ, M. E. de. Doses de boro na soja, em diferentes condições de acidez do solo: I. Produção de matéria seca e de grãos e nível crítico no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 157-161, 1990 a.

BUZETTI, S.; MURAOKA, T.; SÁ, M. E. de. Doses de boro na soja, em diferentes condições de acidez do solo: II. Níveis críticos na planta e nos grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 163-166, 1990 b.

CARPENTIERI-PÍPOLO, V.; ASSIS, J.; GARCIA, I. P. Efeito de doses de calcário e boro no crescimento do girassol (*Helianthus annuus* L.). **Semina**, Passo Fundo, v. 20, n. 1, p. 64-66, mar. 1999.

CHAUDHARY, D. R.; SHUKLA, L. M. Evaluation of extractantes for predicting availability of boron to mustard in arid soils of India. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, n. 1 2, p. 267-283, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 1997. 212p.

COMISSÃO ESTADUAL DE FERTILIDADE DO SOLO DE PERNAMBUCO. **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. Recife. IPA. 1998.

DANNEL, F.; PFEFFER, H.; RÖMHELD, V. Update on boron in higher plants- uptake, primary translocation and compartentation. **Plant Biology**, New York, v. 4, p. 193-204, 2002.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2. ed. ver. New York: Marcel Dekker, 1997, 656 p.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 57-62, 2000.

FERREIRA, M. E. et al. **Microelementos e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPQ/ FAPESP/ POTAFOS, 2001 a. 600p.

FERREIRA, G. B. et al. Influência de algumas características do solo nos teores de boro disponível. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 91-101, 2001 b.

FERREIRA, G. B. et al. Interferência de ferro na dosagem de boro no solo com azometina-H em soluções extratoras ácidas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 9, p. 1311-1318, set. 2002.

FERREYRA H., F.F.; SILVA, F. R. Frações de boro e índices de disponibilidade em solos do estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 227-236, 1999.

FERRI, M. G. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. rev. São Paulo: Ed. Pedagógica e Universitária, 1985. 362p.

FURLANI, A. M. C. et al. Exigência a boro em cultivares de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 25, p. 929-937, 2001.

GOLDBACH, H. E. et al. Rapid response reactions of roots to boron deprivation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 164, n. 2, p. 173-181, apr. 2001.

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

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

GOLDBERG, S. Reanalysis of boron adsorption on soils and soil minerals using the constant capacitance model. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 63, p. 823-829, 1999.

GOLDBERG, S. et al. Soil boron extractions as indicators of boron content of field-grown crops. **Soil Science**, Baltimore, v. 167, n. 11, p. 720-728, nov. 2002.

GOLDBERG, S.; C. GRIEVE. Boron adsorption by maize cell walls. **Plant and Soil**, Wageningen, v. 251, p. 137-142, 2003.

GOLDBERG, S. et al. Effect of high boron application on boron content and growth of melons. **Plant and Soil**, Wageningen, v. 256, p. 403-411, 2003.

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

GUPTA, U. C. **Boron and its role in crop production**. Charlottetown: CRC Press, 1993. 237p.

HOROWITZ, A.; DANTAS, H. da S. Boro disponível nos solos da zona Litoral-Mata de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 8, p. 163-168, 1973.

HOU, J.; EVANS, L. J.; SPIERS, G. A. Chemical fractionation of soil boron: I Method development. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 76, n. 4, p. 485-491, nov. 1996.

JAHIRUDDIN, M. et al. Adding boron and zinc to soil for improvement of fodder value of soybean and corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.32, n. 17 18, p. 2943-2951, 2001.

KRISHNASAMY, R.; MATHAN, K. K. Path coefficient analysis of zinc and boron adsorption in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.32, n. 3 4, p. 465-475, 2001.

LIMA, S. F.; ANDRADE, M. J. B. de; CARVALHO, J. G. de. Resposta do feijoeiro à adubação foliar de boro, molibdênio e zinco. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 23, n. 2, p. 462-467, abr/jun. 1999.

MARIANO, E. D. et al. Boro em solos de várzea do sul de Minas Gerais e a cultura do feijoeiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, n. 4, p. 1051-1058, out/dez. 1999.

MARIANO, E. D. et al. Níveis críticos de boro em solos de várzea para o cultivo do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 8, p. 1637-1644, ago. 2000.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. Deficiência de boro em soja. **Bragantia**, Campinas, n. 47, n. 2, p. 325- 331, 1988.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. Resposta do feijoeiro a doses de boro em cultivo de inverno e de primavera. **Bragantia**, Campinas, n. 57, n. 2, p. 387- 392, 1998.

MEYER, M. L.; BLOOM, P. R. Boric and silicic acid adsorption and desorption by a humic acid. **Journal Environment Quality Proceedings**, Madison, v. 26, p. 63-69, 1997.

MYLAVARAPU, R. S. et al. Evaluation of Mehlich-1 and Mehlich-3 extraction procedures for plant nutrients in acid mineral soils of Florida. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, n. 5/6, p. 807-820, 2002.

NABLE, R. O.; BAÑUELOS, G. S.; PAULL, J. G. Boron toxicity. **Plant and Soil**. Wageningen, v. 193, p. 181-198, 1997.

OLIVEIRA, R. F. de; SINGH, R; CRUZ, E. de S. **Disponibilidade de boro em solos do trópico úmido brasileiro**. Amazônica Oriental: EMBRAPA, 1999. 21p. (Boletim técnico, 11).

PARKS, W. L.; WHITE, J. L. Boron retention by clay and humus systems saturated with various cations. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 16, n. 3, p. 298-300, jul. 1952.

PAULO, E. M. et al. Deficiência de boro em mamona. **Bragantia**, Campinas, v. 48, n. 2, p 241-247, 1989.

PFEFFER, H.; DANDEL, F.; RÖMHELD, V. Are there two mechanisms for boron uptake in sunflower? **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 155, p. 34-40, feb. 1999.

QUAGGIO, J. A.; ROSSETTI, V.; CHAGAS, C. M. Anormalidades de tangerineiras "Poncã", no estado de Minas Gerais, provocadas por deficiência de boro. **Bragantia**, Campinas, v. 55, n. 1, p. 157-162, 1996.

RAZA, M. et al. Boron fractionation in some Saskatchewan soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 82, n. 2, p. 174-179, 2002.

ROCHA, G. C. Micronutrientes nos solos do Brasil. **Semina**, Passo Fundo, v. 16, n. 1, p. 158-168, mar. 1995.

RYAN, J.; SINGH, M.; YAU, S. K. Spatial variability of soluble boron in Syrian soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, p. 407-417, 1998.

SILVA, F. R.; FERREYRA H. F. F. Avaliação de extratores de boro em solos do estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 471-478, 1998 a.

SILVA, F. R.; FERREYRA H. F. F. Boro total e solúvel e suas relações com alguns atributos dos solos do estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 595-602, 1998 b.

SILVEIRA, P. M. da; DYNIA, J. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Resposta do feijoeiro irrigado a boro, zinco e molibdênio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 20, n.2, p. 198-204, abr/jun. 1996.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reaction**. New York: Willey Interscience, 1994. 443p.

TANIGUCHI, C. A. K.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Comparação de métodos para determinação de boro em solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: (sn), 2003. P. 1-4.

TORUN, B. et al. Differences in shoot boron concentrations, leaf symptoms, and yield of turkish barley cultivars grown on boron-toxic soil in field. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 9, p. 1735-1747, 2003.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ALVES, G. C. Aplicação de duas isotermas de adsorção de boro em solos de baixada do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 361-365, 1998.

VIEZZER, H. P. O.; FRÁGUAS, H. C.; SINSKI, I. Avaliação da adsorção de boro em solos sob vinhedos na serra gaúcha. **Bragantia**, Campinas, n. 54, n. 1, p. 187-191, 1995.

XU, J. M. et al. Soil boron fractions and their relationship to soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 133-138, 2001.

WOLF, B. The determination of boron in soil extracts, plant materials, composts, water and nutrient solutions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 2, p. 363-374, 1971.

WOLF, B. Improvements in the azomethine-H method for determination of boron. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 5, p. 39-44, 1974.