

FRAÇÕES DE BORO E ÍNDICES DE DISPONIBILIDADE EM SOLOS DO ESTADO DO CEARÁ⁽¹⁾

F. F. FERREYRA H.⁽²⁾ & F. R. SILVA⁽³⁾

RESUMO

Em 29 amostras superficiais (0-20 cm) de solos do estado do Ceará, foram determinadas diferentes frações de boro e estabelecidas relações com algumas propriedades do solo e com o boro solúvel, usado como índice de disponibilidade para as plantas. As frações de boro foram analisadas, seguindo-se um esquema de fracionamento seqüencial. Determinaram-se o boro solúvel em água (B-Sol), o boro não especificamente adsorvido (B-NEsAd), o boro especificamente adsorvido (B-EsAd), o boro associado a óxidos de Mn (B-OxMn), o boro associado a óxidos de Fe e Al amorfo (B-OxFeA) e a óxidos de Fe e Al cristalino (B-OxFeC), e o boro residual (B-Res). Também foram determinados o boro total (B-Total) e o solúvel em três extratores: água quente, HCl 0,05 mol L⁻¹ e manitol 0,05 mol L⁻¹ + CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. O teor de boro total nos solos variou de 10,5 a 24,0 mg kg⁻¹ (média de 14,4 mg kg⁻¹). As frações B-Sol, B-NEsAd e B-EsAd apresentaram teores entre 0,05 e 0,79 mg kg⁻¹, representando entre 0,3 a 4,4% do B-Total. Dentre os óxidos, houve predominância do B-OxFeC (média de 4,4 mg kg⁻¹) com teores entre 1 a 2 vezes superiores aos de B-OxFeA (média de 2,72 mg kg⁻¹). Na maioria dos solos, a fração predominante foi o B-Res (média de 6,22 mg kg⁻¹), ocluso em minerais silicatados, com teores que variaram de 19,6 a 70,7% do B-Total. Os valores de B disponível, nos três extratores, correlacionaram-se de forma altamente significativa entre si e com as frações B-Sol, B-NEsAd e B-EsAd. A matéria orgânica e a argila foram as propriedades que se correlacionaram melhor com o B-Sol, B-NEsAd e B-EsAd.

Termos de indexação: boro disponível, propriedades do solo, micronutriente, fracionamento.

⁽¹⁾ Trabalho financiado pelo CNPq. Recebido para publicação em julho de 1997 e aprovado em dezembro de 1998.

⁽²⁾ Professor Titular do Departamento de Ciências do Solo, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará (UFC). Caixa Postal 12.168, CEP 60021-970 Fortaleza (CE). Bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Pesquisadora do Departamento de Ciências do Solo, Centro de Ciências Agrárias, UFC.

SUMMARY: *BORON FRACTIONS AND AVAILABILITY INDICES IN SOILS OF CEARÁ, BRAZIL*

Different soil boron fractions were evaluated from 29 superficial (0-20 cm) soil samples in Ceará, Brazil. Relationships were established between soil fractions and soil properties and soluble boron, which has been used as an index of boron availability to the plants. Fractional boron analyses of the soils were carried out following a sequential procedure. The following determinations were carried out: the water soluble boron (B-Sol), the not specifically adsorbed boron (B-NEsAd), the boron associated to manganese oxide (B-OxMn), the boron associated to Fe and Al amorphous oxides (B-OxFeA), the boron associated to Fe and Al crystalline oxides (B-OxFeC) and the residual boron (B-Res). The total boron (B-Total) was assessed as well as the available boron by means of three extractors: hot water (B-H₂Oq), 0.05 mol L⁻¹ hydrochloric acid (B-HCl) and 0.05 mol L⁻¹ mannitol+ 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂ (B-Man). B-Sol, B-NEsAd and EsAd have exhibited amounts ranging from 0.05 to 0.79 mg kg⁻¹, which represents 0.3 to 4.43% of the B-Total. Among the oxides there was a predominance of B-OxFeC with fractions 1 to 2 times higher than those of B-OxFeA. In all soil samples, the B-Res (occluded in silicate minerals) was the predominant fraction, with amounts ranging from 19.6 to 70.7% of the B-Total. The available B, values removed by the three extractors, were highly correlated among themselves and with B-H₂O, B-NEsAd and B-EsAd fractions. Clay and organic matter were the properties which best correlated with the B-Sol, B-NEsAd and B-EsAd.

Index terms: available boron, soil properties, micronutrient, fractionation.

INTRODUÇÃO

O boro pode ser encontrado nos solos sob várias formas, as quais variam em sua disponibilidade para as plantas. Segundo Keren & Bingham (1985), o boro do solo pode ser separado em três categorias distintas: (a) B nos minerais primários (turmalina); (b) B adsorvido pelos constituintes dos solos (minerais de argila, sesquióxidos, matéria orgânica) e (c) B na solução do solo (como ácido bórico e íons borato). Os níveis de boro na solução do solo são controlados, principalmente, por processos de precipitação e adsorção. Por outro lado, a adsorção de boro é influenciada pelas propriedades dos solos, tais como: conteúdo de argila e área superficial específica (Biggar & Fireman, 1960; Hatcher et al., 1967), tipos de minerais de argila (Hingston, 1964; Keren & Mezuman, 1981), sesquióxidos (Hatcher et al., 1967; Sims & Bingham, 1968), matéria orgânica (Parks & White, 1952), dentre outros. Diversos pesquisadores determinam as diferentes formas de boro utilizando extratores específicos (de diferentes capacidades de extração) para cada forma, seguindo esquemas de fracionamento seqüenciais e não-seqüenciais para elementos metálicos traços em solos e sedimentos (Tessier et al., 1979; Harrison et al., 1981; Hou et al., 1994, 1996). Nesses esquemas, comumente são determinadas as frações: B solúvel em água, B não especificamente adsorvido na superfície do solo ou trocável, B especificamente adsorvido ou complexado pela matéria orgânica do solo, B ocluso em óxido de Mn, B associado aos óxidos

e hidróxidos de Fe e Al amorfos e cristalinos e o B residual, ou associado aos silicatos do solo.

Na avaliação do B disponível do solo, são utilizados diversos extratores com diferentes capacidades de extração. Dentre os extratores mais utilizados, destacam-se: água quente sob refluxo (Berger & Truog, 1939; Bataglia & Raij, 1990); soluções de HCl 0,05 mol L⁻¹ (Catani et al., 1970; Ponnampuruma et al., 1981; Correa et al., 1985); Mehlich-3 (Jin-Yun et al., 1988); soluções de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (Parker & Gardner, 1981; Jeffrey & McCallum, 1988; Spouncer et al., 1992); acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 4,8 (Jin-Yun et al., 1988); extrato de saturação (Elsewi & Elmalky, 1979; Gestring & Soltanpour, 1984) e soluções complexantes como AB-DTPA e manitol (Gestring & Soltanpour, 1984, 1987). Admite-se que tais extratores diferenciem-se por extrair quantidades ou proporções diferentes de boro das várias formas ou frações presentes no solo, as quais estão ou podem tornar-se disponíveis às plantas, daí a importância do conhecimento da contribuição de cada uma dessas frações em relação à disponibilidade de boro para as plantas.

Este trabalho teve como objetivo estudar a distribuição das diferentes frações de boro em amostras superficiais de diferentes classes de solos do estado do Ceará, bem como a relação dessas frações com o boro solúvel em três extratores, usados como índice de disponibilidade para as plantas, e com algumas propriedades dos solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar as diferentes frações de boro no solo, foram coletadas vinte e nove amostras superficiais (0-20 cm) em unidades de mapeamento do estado do Ceará, baseadas no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do estado do Ceará (Jacomine et al., 1973a,b). As amostras utilizadas em cada classe de solo foram: cinco de Areia Quartzosa distrófica (AQd), uma de Aluvial eutrófico (Ae), uma de Planossolo (PL), duas de Bruno Não-Cálcico (NC), duas de Cambissolo eutrófico (Ce), onze de Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), três de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVd) e uma de Litossolo eutrófico (Re).

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, passadas em peneiras de 2 mm de abertura e submetidas à caracterização física e química,

segundo os métodos adotados pela EMBRAPA (1997). Também foram determinados os teores dos óxidos de Mn, pelo método de Chao (1972), e dos óxidos de Fe amorfos e cristalinos, pelo método de Chao & Zhou (1983) (Quadro 1).

As diferentes frações de boro foram extraídas, seguindo-se um procedimento de fracionamento seqüencial, usando-se extratores específicos a cada forma ou fração (Jin-Yun et al., 1987), conforme procedimento descrito a seguir:

1. *Boro solúvel em água fria* (B-Sol): extraído com água na temperatura do laboratório ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), na relação solo-água 1:2 e 24 h de agitação;
2. *Boro não especificamente adsorvido ou trocável* (B-NEsAd): extraído com CaCl_2 0,02 mol L⁻¹ na relação solo-extrator 1:2 e 24 h de agitação a $25 \pm 2^\circ\text{C}$;

Quadro 1. Atributos físicos e químicos de vinte e nove amostras superficiais (0-20 cm) de solos do estado do Ceará

Solo		Atributo ⁽¹⁾								
Nº	Classe ⁽²⁾	Argila	Silte	MO	pH	CE	T	Mn-Ox	Fe-OxA	Fe-OxC
		g kg ⁻¹				dS m ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		
1	AQd2	84	42	4,0	4,5	0,28	43	0,7	187	371
2	AQd2	67	44	5,7	6,1	0,20	41	5,3	346	911
3	AQd4	39	54	3,8	6,2	0,34	31	0,8	54	110
4	AQd5	53	40	2,4	5,8	0,25	26	0,5	44	66
5	AQd5	29	17	3,4	5,5	0,21	30	1,4	97	413
6	Ae1	181	468	2,2	7,0	0,58	141	18,4	1.932	1.995
7	PL1	66	340	6,2	5,1	0,27	49	1,7	816	1.188
8	NC8	80	170	5,5	5,4	0,46	93	19,2	2.711	2.955
9	NC14	109	199	12,4	6,0	0,64	111	131,0	1.370	3.790
10	Ce1	149	127	31,0	7,0	0,67	94	35,7	819	3.397
11	Ce2	330	112	9,0	5,9	0,80	95	37,9	882	4.752
12	PVe4	201	194	9,6	5,1	0,67	53	19,4	2.036	3.061
13	PVe10	199	207	15,2	5,1	0,43	81	2,7	2.098	3.686
14	PVe28	160	94	6,5	5,5	0,34	58	91,7	804	2.678
15	PVe32	60	167	9,3	6,3	0,52	63	15,6	488	2.236
16	PVe32	60	42	5,7	7,0	0,76	32	4,3	98	493
17	PVe40	68	67	3,0	6,1	0,67	28	5,7	95	779
18	PV1	323	154	10,0	4,6	0,18	84	2,6	2.586	6.062
19	PV2	24	199	3,4	4,9	0,27	22	2,3	132	488
20	PV2	84	179	5,0	5,5	0,59	82	5,9	624	1.440
21	PV2	142	89	5,7	4,9	1,16	61	3,6	500	568
22	PV4	85	316	4,3	5,3	0,94	28	13,3	2.894	4.029
23	LVd3	475	59	34,6	4,2	0,80	142	1,2	2.269	4.142
24	LVd3	468	86	32,1	4,5	0,24	121	1,3	1.784	3.731
25	LVd7	130	93	10,7	4,2	0,17	90	1,9	1.045	2.710
26	LVd7	136	87	27,1	5,1	0,50	92	11,6	902	1.150
27	Re1	60	160	4,1	5,9	0,70	116	3,6	828	1.188
28	Re25	50	253	7,0	4,7	0,19	25	1,7	687	884
29	Re25	60	123	7,6	5,4	0,66	39	2,8	707	1.395

⁽¹⁾ MO = matéria orgânica; CE = condutividade elétrica; T = capacidade de troca de cátions; Mn-Ox = teor de Mn na forma de óxidos; Fe-OxA e Fe-OxC = teor de Fe na forma de óxidos amorfos e cristalinos; respectivamente. ⁽²⁾ Abreviatura da classe de solo seguida de número indica a unidade de mapeamento onde foi coletada a amostra (Jacomine et al., 1973a,b). AQd = Areia Quartzosa distrófica; Ae = Aluvial eutrófico; PL = Planossolo; NC = Bruno Não-Cálcico; Ce = Cambissolo; PVe = Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico; PV = Podzólico Vermelho-Amarelo; LVd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; Re = Litossolo eutrófico.

3. *Boro especificamente adsorvido ou complexado pela matéria orgânica* (B-EsAd): extraído com manitol $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ + CaCl_2 $0,02 \text{ mol L}^{-1}$, na relação solo-extrator 1:2 e 24 h de agitação a $25 \pm 2^\circ\text{C}$;
4. *Boro associado aos óxidos de manganês* (B-OxMn): estimado pela diferença: (B-OxMn + B-OxFeA) - B-OxFeA. Após a extração do B-EsAd, em uma subamostra do solo residual, o (B-OxMn + B-OxFeA) foi extraído com oxalato de amônio pH 3,25, na relação solo-extrator 1:5 e agitação no escuro durante 4 h. Numa segunda subamostra, o B-OxFeA foi determinado de acordo com o procedimento indicado na fração 5;
5. *Boro associado aos óxidos e hidróxidos de Fe e Al amorfos* (B-OxFeA): extraído com oxalato de amônio $0,175 \text{ mol L}^{-1}$ pH 3,25, na relação solo-extrator 1:5 e agitação no escuro durante 4 h, após a extração do B-OxMn com $\text{NH}_2\text{OH.HCl}$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ em HNO_3 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, na relação solo-extrator 1:5, e agitação durante 30 min a $25 \pm 2^\circ\text{C}$;
6. *Boro associado aos óxidos e hidróxidos de Fe e Al cristalinos* (B-OxFeC): extraído com oxalato de amônio $0,175 \text{ mol L}^{-1}$ pH 3,25, na relação solo:extrator 1:5 e 30 min de aquecimento a 100°C (Chao & Zhou, 1983);
7. *Boro residual* (B-Res): estimado por diferença entre o boro total e a soma das demais frações;
8. *Boro total* (B-Total): determinado em extratos obtidos após abertura da amostra por fusão, em cadinho de platina, de uma mistura de 0,5 g de solo com 3,0 g de carbonato de sódio e dissolução do resíduo em H_2SO_4 $2,0 \text{ mol L}^{-1}$, seguindo-se o procedimento indicado por Jackson (1970).

Além do fracionamento, fez-se a extração do boro no solo, utilizando as seguintes soluções:

1. *Água quente* (B- H_2Oq): o boro foi extraído com água quente sob refluxo por 5 min. Usaram-se 20 g de solo com 40 mL de água desionizada, depois de frio, adicionaram-se três gotas de CaCl_2 $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e, em seguida, filtrou-se o material. (Berger & Truog, 1939; Bataglia & Raj, 1990);
2. *Manitol* $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (B-Man): utilizaram-se 20 g de solo com 40 mL de solução extratora e 8 h de agitação, seguida de filtração (Cartwright et al., 1983), e
3. *HCl* $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ (B-HCl): usaram-se 10 g de solo com 20 mL de solução extratora e 5 min de agitação, seguida de filtração (Ponnamperuma et al., 1981).

Em todos os extratos, na filtração, utilizou-se papel filtro Whatman 42, e o boro foi determinado pelo método da azometina-H (Wolf, 1971, 1974).

Para todas as frações de boro do solo foram estabelecidas correlações simples e múltiplas com o boro solúvel (B- H_2Oq , B-Man e B-HCl), usado como índice de disponibilidade, e com algumas propriedades do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, a distribuição das diferentes frações de boro nos solos estudados variou amplamente entre classes de solos e dentro da mesma classe (Quadro 2).

Dentre as frações de boro determinadas, as que apresentaram os menores teores foram: o B-Sol, que representa o boro da solução do solo (Jin-Yun et al., 1987), com teores variando de 0,10 a $0,62 \text{ mg kg}^{-1}$, representando de 2,2 a 4,45 % do boro total; o B-NEsAd ou trocável, extraído pelo CaCl_2 , com teores entre 0,05 e $0,74 \text{ mg kg}^{-1}$, representando de 0,32 a 2,27% do B-Total, e o B-EsAd ou complexado com a matéria orgânica do solo, com teores entre 0,05 e $0,79 \text{ mg kg}^{-1}$, representando de 0,32 a 2,25% do B-Total. Os conteúdos de B-Sol, com exceção dos solos 23 e 24, foram superiores aos das frações B-NEsAd e B-EsAd, fato também encontrado por Jin-Yun et al. (1987), em solos da região costeira plana da Virginia (USA). Esse comportamento deveu-se, possivelmente, ao fato de serem os solos estudados, em sua maioria, ácidos (Quadro 1). Em condições ácidas, a forma solúvel de boro H_3BO_3^0 predomina sobre a B(OH)_4^- , sendo sua diferença maior quando aumenta a acidez do meio (Lindsay, 1991). Por outro lado, os íons B(OH)_4^- podem substituir grupos OH das bordas dos cristais de argila e serem adsorvidos de forma trocável (Keren & Mezuman, 1981; Keren et al., 1994). A matéria orgânica, por meio de grupos hidroxila e carboxílicos ácidos, também pode adsorver íons borato de forma trocável e complexada como mono-quelatos e bi-quelatos com grupos diol (alcoólicos ou fenólicos) (Yermiyaho et al., 1988).

O boro associado aos óxidos do solo representaram, em média, 64,8% do B-Total nos solos estudados, o que indica a grande afinidade desses compostos pelo boro. Dentre as frações de boro associadas a óxidos, os menores teores corresponderam ao B-OxMn com teores que variaram de 0,10 a $1,70 \text{ mg kg}^{-1}$, representando de 0,65 a 10,69% do B-Total. Nesta fração, as maiores percentagens foram encontradas nos solos Bruno Não-Cálcicos (8 e 9) e Cambissolos (10 e 11) e os menores nas Areias Quartzosas (1, 3, 4 e 5) que também contêm os maiores e menores teores de óxidos de manganês, respectivamente (Quadro 1).

As frações de boro associadas aos óxidos de Fe e Al amorfos (B-OxFeA) e cristalinos (B-OxFeC), extraíveis pelo oxalato de amônio, variaram de 0,90 a $0,52 \text{ mg kg}^{-1}$ e 2,2 e $6,7 \text{ mg kg}^{-1}$, representando de 6,43 a 32,21% e 18,33 a 46,43% do B-Total, respectivamente. Os altos conteúdos de boro associados aos óxidos de Fe e Al justificam-se pelo fato de o boro poder adsorver H_3BO_3^0 e íons borato de forma trocável, por simples reações de troca com os grupos hidroxila superficiais; e especificamente adsorvido, formando duas ligações metal-B-O, no interior de complexos que não contêm água entre o íon adsorvido e a superfície do grupo funcional (Sims & Bingam, 1968; Goldberg, 1993, 1997).

Quadro 2. Frações de boro e teores de boro solúvel em três extratores de vinte e nove amostras superficiais (0-20 cm) de solos do estado do Ceará

Número de solo	Frações de boro ⁽¹⁾							Boro total	Boro solúvel ⁽²⁾		
	Sol	NEsAd	EsAd	OxMn	OxFeA	OxFeC	B residual		H ₂ O _q	HCl	Man
	mg kg ⁻¹										
1	0,24	0,13	0,15	0,24	1,7	2,9	5,1	10,5	0,33	0,50	0,18
2	0,35	0,17	0,18	0,28	3,3	4,5	5,5	14,3	0,42	0,40	0,28
3	0,15	0,10	0,10	0,10	0,9	2,7	9,9	14,0	0,39	0,26	0,23
4	0,08	0,05	0,05	0,10	2,1	4,5	8,5	15,4	0,22	0,18	0,11
5	0,10	0,08	0,07	0,12	2,3	4,8	6,9	14,3	0,24	0,19	0,10
6	0,31	0,18	0,27	0,66	1,6	2,2	6,8	12,0	0,53	0,65	0,26
7	0,28	0,16	0,12	0,24	2,9	5,2	2,3	11,2	0,29	0,60	0,20
8	0,22	0,10	0,06	0,92	3,0	4,3	3,4	12,0	0,27	0,53	0,22
9	0,46	0,24	0,26	1,70	3,1	3,4	6,7	15,9	0,51	0,61	0,20
10	0,60	0,32	0,28	1,12	2,6	4,5	7,4	16,8	1,09	1,22	0,36
11	0,25	0,15	0,12	0,84	2,0	4,2	6,9	14,5	0,48	0,57	0,22
12	0,18	0,10	0,11	0,40	1,9	3,0	5,4	11,1	0,37	0,38	0,15
13	0,25	0,18	0,16	0,20	2,3	3,3	4,2	10,6	0,35	0,49	0,18
14	0,21	0,16	0,11	1,36	4,9	6,0	3,0	15,7	0,30	0,25	0,14
15	0,14	0,15	0,15	0,70	2,9	3,6	2,9	10,5	0,33	0,41	0,18
16	0,36	0,14	0,16	0,36	2,0	3,8	6,2	13,0	0,36	0,36	0,15
17	0,35	0,10	0,10	0,36	2,3	3,7	4,1	11,0	0,40	0,43	0,25
18	0,25	0,26	0,29	0,40	2,6	4,8	6,4	15,0	0,63	0,59	0,30
19	0,15	0,08	0,12	0,24	2,1	3,9	6,4	13,2	0,17	0,27	0,18
20	0,19	0,15	0,17	0,36	2,7	3,9	4,3	11,8	0,34	0,53	0,16
21	0,21	0,10	0,14	0,40	3,3	4,5	11,8	20,4	0,27	0,40	0,15
22	0,33	0,17	0,10	0,72	2,1	5,2	15,4	24,0	0,55	0,57	0,27
23	0,48	0,74	0,79	0,28	5,2	6,6	5,2	19,3	0,59	0,84	0,31
24	0,32	0,39	0,34	0,30	4,3	5,6	6,0	17,2	0,30	0,45	0,20
25	0,20	0,16	0,15	0,18	2,8	5,8	5,9	15,2	0,29	0,39	0,15
26	0,28	0,15	0,20	0,24	4,6	6,7	8,3	20,5	0,28	0,55	0,14
27	0,26	0,10	0,10	0,40	2,4	4,7	3,6	11,5	0,47	0,51	0,24
28	0,22	0,15	0,13	0,20	2,5	5,3	5,6	14,1	0,33	0,37	0,15
29	0,62	0,25	0,21	0,44	2,2	3,6	6,7	14,0	0,71	0,57	0,36

⁽¹⁾ Sol = B solúvel em água; NEsAd = B não especificamente adsorvido; EsAd = B especificamente adsorvido; OxMn = B associado a óxidos de manganês; OxFeA e OxFeC = B associado a óxidos de Fe amorfos e cristalinos, respectivamente. ⁽²⁾ Índices de B disponível: H₂O_q, HCl e Man = B extraído pela água quente, HCl 0,05 mol L⁻¹ e manitol, 0,05 mol L⁻¹ + CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, respectivamente.

Os maiores conteúdos de B-OxFeA e B-OxFeC em relação ao B-OxMn são devidos ao fato de serem as quantidades de óxidos de Fe e Al nos solos superiores às dos óxidos de manganês. Entretanto, quando se estabeleceram relações com as médias dos teores de óxidos de Mn e de óxidos de Fe amorfos e cristalinos com o boro ligado a seus respectivos óxidos, verificou-se que a relação Fe-OxA/B-OxFeA e Fe-OxC/B-OxFeC foi próxima - 115,9 e 106,1, respectivamente, enquanto a relação Mn-Ox/B-OxMn foi aproximadamente três vezes menor - 31,9. Isto evidencia que a afinidade dos óxidos de manganês pelo boro é superior à dos óxidos de Fe e Al.

A fração B-Res, que representa o boro ligado aos minerais silicatados do solo, apresentou teores que variaram de 2,3 a 15,4 mg kg⁻¹, representando de 19,11 a 70,71% do boro total do solo. Comparando todas as frações de boro individualmente, o B-Res predominou em 23 dos 29 solos estudados,

constituindo, em média, 42,42% do B-Total. Nos outros seis solos, a fração predominante foi o B-OxFeC. Entretanto, quando se considerou o boro associado a óxidos minerais (soma), o boro associado a óxidos passou a ser predominante.

A distribuição das frações de boro em relação ao boro total não seguiu um padrão definido nas diferentes classes e nem dentro da mesma classe de solo. Esse fato é explicado pela ampla faixa de variação dos atributos físicos e químicos dos solos estudados, certamente causada por diferenças no material de origem e nos processos de desenvolvimento do solo. A influência do material de origem na distribuição relativa das frações de boro, para quatro classes diferentes e para solos da mesma classe, é ilustrada nas figuras 1 e 2, respectivamente. Na figura 1, observa-se que nos solos 3 (AQd4) e 11 (Ce), originados de sedimentos do grupo Barreiras e Arenito Calcífero da Formação Jandaíra,

respectivamente, o B-Res é a fração predominante; enquanto no solo 14 (PVe 28), formado de material areno-argiloso relativo ao terciário que recobre rochas do Pré-Cambriano, e no solo 23 (LVd₃), originado de arenitos argilosos da Formação Exu (Jacomine et al., 1973a), o B-OxFeA e o B-OxFeC são as frações predominantes. Na figura 2, verifica-se que o solo 15 (PVe 32), derivado de gnaiss, migmatito, micaxisto e granito, apresenta maior proporção nas frações B-OxFeC e B-OxFeA do que a fração B-Res; no solo 17 (PVe 40), derivado de sedimentos argilo-arenosos do terciário, as proporções das frações B-OxFeC e B-Res são próximas; enquanto o solo 18 (PV 1), derivado de gnaiss e migmatito do Pré-Cambriano, e o 21 (PV 2), derivado de sedimentos do grupo Barreiras, apresentam o B-Res em maior proporção. Deve-se salientar que, além do material de origem, a textura do solo, o pH e a lixiviação também são considerados fatores que influem de forma dominante na distribuição das diversas frações de boro no solo (Shorrocks, 1997).

Os teores de boro solúvel, considerando todas as amostras sem distinção de classes de solos, variaram de 0,17 a 1,09 mg kg⁻¹, com média de 0,40 mg kg⁻¹ para a água quente; de 0,18 a 1,22 mg kg⁻¹, com média de 0,49 mg kg⁻¹ para o extrator HCl 0,05 mol L⁻¹, e de 0,10 a 0,36 mg kg⁻¹, com média de 0,20 mg kg⁻¹ para o manitol (Quadro 2). O extrator HCl extraiu mais boro do que a água quente e o manitol (complexante). As maiores quantidades de boro extraídas pelo HCl 0,05 mol L⁻¹ foram causadas possivelmente pela maior solubilização de minerais que continham boro, enquanto as baixas quantidades de boro extraídas pelo manitol são atribuídas ao fato de serem ácidos os solos usados neste estudo. O manitol forma complexos principalmente com íons

borato, os quais são predominantes em solos alcalinos (Biswapati & Kumar, 1993).

Os coeficientes de correlação simples entre o boro solúvel e as frações de B nos solos (Quadro 3) mostram correlação positiva e significativa a 1% de probabilidade entre boro extraído pela água quente, HCl e manitol, quando relacionados entre si, indicando que eles extraíram quantidades proporcionais de boro do solo. Quando se correlacionou o boro extraído pelos três extratores com o boro nas diferentes frações do solo, verificou-se que as frações B-Sol, B-NEsAd e B-EsAd apresentaram coeficientes de correlação altamente significativos, indicando a importante contribuição dessas frações na quantidade de boro solúvel, nos três extratores, usado como índice de disponibilidade para as plantas. O B-OxMn correlacionou-se de forma significativa com o B-H₂Oq e o B-HCl e não-significativa com o B-Man. As outras três frações (B-OxFeA, B-OxFeC e B-Res) não apresentaram correlação com boro solúvel. Vê-se, no quadro 3, que o B-H₂Oq, B-HCl e B-Man representam principalmente o boro das frações B-Sol e B-NEsAd, consideradas prontamente disponíveis para as plantas (fator intensidade); e em menor proporção o das frações B-EsAd e B-OxMn (com exceção do B-Man), consideradas lentamente disponíveis (fator quantidade). As frações B-OxFeA, B-OxFeC e B-Res não influenciaram o boro solúvel, nos três extratores, fato que está de acordo com o indicado por Jin-Yun et al. (1987) de que estas frações contribuem com quantidades muito pequenas de boro para plantas de ciclo de desenvolvimento curto. Essa afirmativa é reforçada pelas correlações entre os índices de boro disponível e a soma das frações de B (Quadro 3), quando se observou que a inclusão do B-OxFeA reduziu, de maneira acentuada, os coeficientes de correlação. Considerando que os

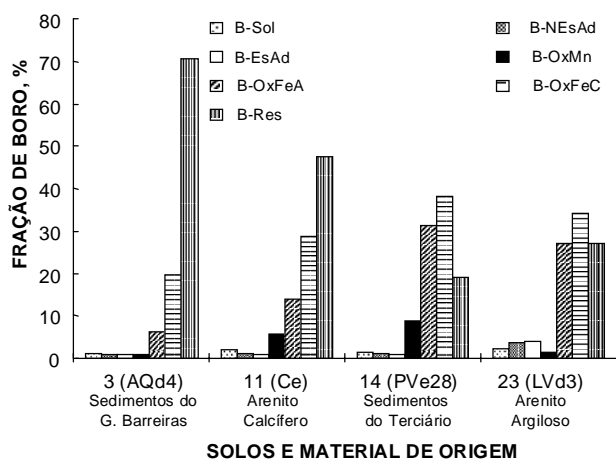


Figura 1. Distribuição percentual das frações de boro em quatro classes de solos de diferentes materiais de origem.

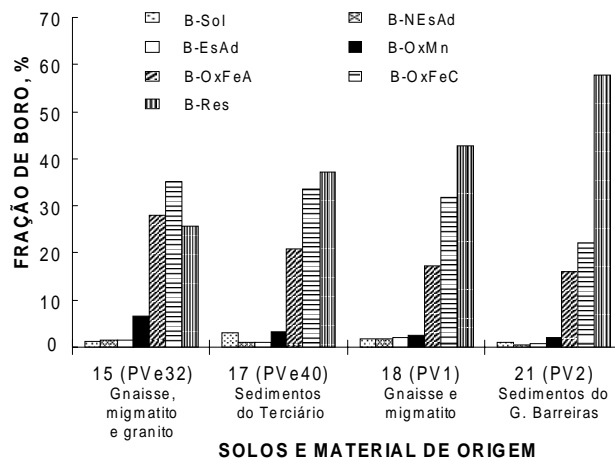


Figura 2. Distribuição percentual de quatro Podzólicos Vermelho-Amarelo de diferentes materiais de origem.

extratores utilizados constituem índices de disponibilidade de boro razoavelmente bons (Ponnamperuma et al., 1981; Cartwright et al., 1983; Bataglia & Raij, 1990), embora não tenham sido utilizadas cultura ou planta indicadora, os resultados obtidos no presente trabalho confirmam os encontrados por Jin-Yun et al. (1987), com o cultivo de milho, e por Tsadilas et al. (1994), com oliveira e cevada.

O quadro 3 mostra, ainda, as correlações entre as diferentes frações de boro no solo. Nesse quadro, observa-se que o B-Sol correlacionou-se de forma altamente significativa com o B-NEsAd e B-EsAd, significativa com o B-OxMn e não-significativa com o B-OxFeA, B-OxFeC e B-Res. Tais resultados indicam que o conteúdo de boro da solução do solo é dependente das frações B-NEsAd, B-EsAd e B-OxMn e, de maneira geral, evidenciam que o equilíbrio químico dessas frações envolve as reações reversíveis indicadas na equação (1); enquanto as demais frações não contribuem ou sua contribuição é inexpressiva em períodos de tempo curto.



As correlações das frações B-NEsAd e B-EsAd com o B-OxMn não foram significativas; enquanto com o B-OxFeA foram altamente significativas, fato também encontrado por Tsadilas et al. (1994). A falta de correlação do B-NEsAd e o B-EsAd com o B-OxMn possivelmente foi devida à ampla faixa de variação dos óxidos de manganês nos solos e aos baixos valores absolutos de seus teores, quando comparados aos de

argila e de matéria orgânica (Quadro 1), responsáveis pela maior parte dos sítios de troca e de adsorção específica no solo; enquanto as correlações altamente significativas dessas frações com o B-OxFeA devem-se aos óxidos amorfos de Fe e Al, os quais, além de serem encontrados em quantidades apreciáveis no solo, adsorvem boro de forma trocável e especificamente adsorvido. Por outro lado, os altos valores de correlação verificados entre as frações B-NEsAd e B-EsAd ($r = 0,965^{**}$) e entre as frações B-OxFeA e B-OxFeC ($r = 0,781^{**}$) indicam que nesses pares as frações de boro são dependentes entre si.

Nas análises de correlação entre as formas de boro e os atributos do solo (Quadro 4), verificou-se que o pH não se correlacionou com o boro solúvel nem com o das frações de boro do solo, exceto com o B-OxMn e B-OxFeC, resultados, em sua maioria, contrários aos reportados por Tsadilas et al. (1994). Possivelmente, isso esteja associado ao fato de os solos usados no estudo serem ácidos (pH entre 4,5 e 7,0); enquanto nos solos usados por Tsadilas et al. (1994) o pH variou de 3,9 a 8,5. O aumento do pH reduz as cargas positivas dependentes do pH, até o ponto de carga zero (PCZ), que podem adsorver íons $\text{B}(\text{HO})_4^-$ por simples mecanismos de troca. Entretanto, a elevação do pH, acima do PCZ, comumente resulta em aumento da adsorção de boro pelos solos, uma vez que a maioria de seus componentes apresenta uma adsorção máxima de boro a valores de pH acima de 7, a qual possivelmente envolve mecanismos de troca de ligantes com os grupos funcionais dihidroxi e hidroxicarboxílicos dos

Quadro 3. Coeficientes de correlação simples entre o boro solúvel em três extratores e as frações de boro em solos do estado do Ceará

Forma de boro solúvel	Coeficiente de correlação ⁽¹⁾								
	B-H ₂ Oq	B-HCl	B-Man	B-Sol	NEsAd	B-EsAd	B-OxMn	B-OxFeA	B-OxFeC
B-H ₂ Oq	1	0,829**	0,840**	0,789**	0,485**	0,429*	0,396*	-0,059 ^{ns}	-0,081 ^{ns}
B-HCl		1	0,711**	0,746**	0,598**	0,564**	0,379*	0,187 ^{ns}	0,088 ^{ns}
B-Man			1	0,770**	0,583**	0,469*	0,219 ^{ns}	-0,018 ^{ns}	-0,089 ^{ns}
				Fração					
B-Sol				1	0,602**	0,541**	0,370*	0,212 ^{ns}	0,051 ^{ns}
B-NEsAd					1	0,965**	0,105 ^{ns}	0,572**	0,402*
B-EsAd						1	0,042 ^{ns}	0,535**	0,317 ^{ns}
B-OxMn							1	0,224 ^{ns}	-0,067 ^{ns}
B-OxFeA								1	0,781**
B-OxFeC									1
B-Res	0,166 ^{ns}	0,004 ^{ns}	0,082 ^{ns}	0,051 ^{ns}	-0,061 ^{ns}	-0,052 ^{ns}	-0,041 ^{ns}	-0,224 ^{ns}	0,025 ^{ns}
B-Total	0,206 ^{ns}	0,206 ^{ns}	0,128 ^{ns}	0,251 ^{ns}	0,366*	0,324 ^{ns}	0,142 ^{ns}	0,446*	0,605**
ΣB1 ⁽²⁾	0,712**	0,751**	0,722**						
ΣB2 ⁽²⁾	0,631**	0,709**	0,653**						
ΣB3 ⁽²⁾	0,659**	0,697**	0,554**						
ΣB4 ⁽²⁾	0,238 ^{ns}	0,432*	0,223 ^{ns}						

(1) *, ** Significativo a 5 e 1%, respectivamente, ^{ns} não-significativo. (2) ΣB1 = B-Sol + B-NEsAd; ΣB2 = B-Sol + B-NEsAd + B-EsAd; ΣB3 = B-Sol + B-NEsAd + B-EsAd + B-OxMn; ΣB4 = B-Sol + B-NEsAd + B-EsAd + B-OxMn + B-OxFeA.

Quadro 4. Coeficientes de correlação simples e múltiplos entre as formas de boro no solo (variável dependente) e atributos dos solos (variável independente) do estado do Ceará

Forma de boro solúvel ⁽³⁾	Coeficiente de correlação (r) ⁽¹⁾									
	Simples						Múltiplo ⁽²⁾			
	pH	MO	Argila	Fe-OxA	Fe-OxC	Mn-Ox	A	B	C	D
B-H ₂ Oq	0,342 ^{ns}	0,408*	0,243 ^{ns}	0,269 ^{ns}	0,458*	0,187 ^{ns}	0,413 ^{ns}	0,484*	0,484 ^{ns}	0,620*
B-HCl	0,149 ^{ns}	0,611**	0,373*	0,404*	0,502**	0,152 ^{ns}	0,617**	0,502*	0,502 ^{ns}	0,721**
B-Man	0,193 ^{ns}	0,303 ^{ns}	0,259 ^{ns}	0,334 ^{ns}	0,396*	-0,024 ^{ns}	0,309 ^{ns}	0,398 ^{ns}	0,432 ^{ns}	0,490 ^{ns}
Fração										
B-Sol	0,202 ^{ns}	0,501**	0,241 ^{ns}	0,201 ^{ns}	0,295 ^{ns}	0,235 ^{ns}	0,526*	0,300 ^{ns}	0,325 ^{ns}	0,577 ^{ns}
B-NEsAd	-0,271 ^{ns}	0,791**	0,748**	0,428*	0,525**	0,050 ^{ns}	0,834**	0,525*	0,543*	0,837**
B-EsAd	-0,241 ^{ns}	0,747**	0,725**	0,375*	0,440*	0,019 ^{ns}	0,797**	0,442 ^{ns}	0,462 ^{ns}	0,807**
B-OxMn	0,371*	0,102 ^{ns}	0,065 ^{ns}	0,265 ^{ns}	0,464*	0,905**	0,103 ^{ns}	0,495*	0,922**	0,933**
B-OxFeA	-0,365 ^{ns}	0,623**	0,489**	0,224 ^{ns}	0,279 ^{ns}	0,257 ^{ns}	0,627**	0,279 ^{ns}	0,332 ^{ns}	0,705**
B-OxFeC	-0,497*	0,490**	0,345 ^{ns}	0,159 ^{ns}	0,204 ^{ns}	-0,039 ^{ns}	0,490*	0,204 ^{ns}	0,238 ^{ns}	0,496 ^{ns}
B-Res	0,017 ^{ns}	-0,032 ^{ns}	-0,036 ^{ns}	0,101 ^{ns}	0,004 ^{ns}	-0,066 ^{ns}	0,037 ^{ns}	0,163 ^{ns}	0,165 ^{ns}	0,176 ^{ns}
B-Total	-0,228 ^{ns}	0,413*	0,304 ^{ns}	0,271 ^{ns}	0,256 ^{ns}	0,121 ^{ns}	0,414 ^{ns}	0,279 ^{ns}	0,288 ^{ns}	0,454 ^{ns}

(1) *, ** Significativo a 5 e 1%, respectivamente, ^{ns} Não-significativo. (2) Variáveis independentes incluídas na correlação: A = MO e argila; B = MO, argila e Fe-OxA; C = MO, argila, Fe-OxA e Fe-OxC; D = MO, argila, Fe-OxA, Fe-OxC e Mn-Ox.

componentes do solo (Yermiyaho et al., 1988, Goldberg, 1993, 1997).

A matéria orgânica do solo correlacionou-se de forma altamente significativa com o boro extraído pelo HCl 0,05 mol L⁻¹ (r = 0,611), significativa com a água quente (r = 0,408) e não-significativa com o manitol (r = 0,303) (Quadro 4). O HCl 0,05 mol L⁻¹ apresentou correlação significativa com o teor de óxido de Fe amorfo e altamente significativa com o teor de óxido de Fe cristalino, enquanto a água quente e manitol apresentaram correlação significativa apenas com os óxidos de Fe cristalino.

Nas análises de correlação múltiplas, o extrator HCl 0,05 mol L⁻¹ apresentou maiores valores de r quando relacionados com a matéria orgânica e argila do solo e quando relacionados com mais de duas propriedades dos solos. A fração B-OxMn esteve diretamente associada aos conteúdos de óxidos de manganês dos solos, apresentando o mais alto coeficiente de correlação simples entre todas as combinações testadas. Por outro lado, as análises de correlação simples e múltiplas também demonstraram que os conteúdos de argila e matéria orgânica dos solos foram os atributos que mais contribuíram nos conteúdos de boro das frações B-NEsAd e B-EsAd, resultados que estão de acordo com o encontrado por Hou et al., 1996.

CONCLUSÕES

1. As frações de B predominantes nos solos são: o B residual ou associado a minerais silicatados do

solo (19,6 a 70,7% do B-Total); o B associado a óxidos de Fe e Al cristalinos (18,3 a 46,7% do B-Total); o B associado a óxidos de Fe e Al amorfos (6,4 a 30% do B-Total) e o B associado a óxidos de Mn (0,65 a 10,69% do B-Total).

2. As frações de B solúvel, B não especificamente adsorvido e B especificamente adsorvido encontram-se em pequenas quantidades no solo, constituindo entre 0,32 e 4,43% do B-Total.

3. O boro solúvel em água é influenciado principalmente pelo conteúdo de matéria orgânica do solo, enquanto as frações do boro não especificamente adsorvido e do boro especificamente adsorvido são influenciadas, além da matéria orgânica, pelos conteúdos de argila e dos óxidos ferro e alumínio do solo.

4. O boro extraído pela água quente, HCl 0,05 mol L⁻¹ e manitol representa principalmente o boro das frações solúvel em água e não especificamente adsorvido ou trocável (fator intensidade), em menor proporção, o boro das frações especificamente adsorvido ou complexado na matéria orgânica e o ligado a óxidos de manganês (fator quantidade).

LITERATURA CITADA

BATAGLIA, O.C. & RAIJ, B. van. Eficiência de extratores na determinação de boro em solos. R. Bras. Ci. Solo, 14:25-31, 1990.

- BERGER, K.C. & TRUOG, E. Boron determination in soils and plants. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 11:540-544, 1939.
- BIGGAR, J.W. & FIREMAN, M. Boron adsorption and release by soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24:205-210, 1960.
- BISWAPATI, M. & KUMAR DE, D. Depthwise distribution of extractable boron in some acidic Inceptisols of India. *Soil Sci.*, 155:256-262, 1993.
- CATANI, R.A.; ALCARDE, J.C. & KROLL, F.M. Extração e determinação do boro solúvel dos solos. *An. ESALQ, Piracicaba*, 27:287-294, 1970.
- CARTWRIGHT, B.; TILLER, K.G.; ZARCINAS, B.A. & SPOUNCER, L.R. The chemical assessment of boron status of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 21:321-332, 1983.
- CHAO, T.T. Selective dissolution of manganese oxides from soils and sediments with acidified $\text{NH}_2\text{OH.HCl}$. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36:764-768, 1972.
- CHAO, T.T. & ZHOU, L. Extraction techniques for selective dissolution of amorphous iron oxides from soils and sediments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:225-232, 1983.
- CORREA, A.E.; PAVAN, M.A. & MIYAZAWA, M. Aplicação de boro no solo e respostas do cafeeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 20:177-181, 1985.
- ELSEWEI, A.A. & ELMALKY, A.E. Boron distribution in soils and waters of Egypt. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:297-300, 1979.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- GESTRING, E.D. & SOLTANPOUR, P.N. Evaluation of ammonium bicarbonate- DTPA soil test for assessing boron availability to alfafa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:96-100, 1984.
- GESTRING, E.D. & SOLTANPOUR, P.N. Comparison of soil tests for assessing boron toxicity to alfafa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1214-1219, 1987.
- GOLDBERG, S. Chemistry and mineralogy of boron in soils. In: GUPTA, U.C. Boron and its role in crop production. Boca Raton, CRC Press, 1993. p.3-44.
- GOLDBERG, S., Reactions of boron with soils. *Plant Soil*, 193:35-48, 1997
- HARRISON, R.M.; LAXE, D.P.H. & WILSON, S.J. Chemical association of lead, cadmium, copper and zinc in street dusts and roadside soils. *Environ. Qual., Sci. Technol.*, 15:1378-1383, 1981.
- HATCHER, J.T.; BOWER, C.A. & CLARK, M. Adsorption of boron by soils as influenced by hydroxy aluminum and surface area. *Soil Sci.*, 104:422-426, 1967.
- HINGSTON, F.J. Reaction between boron and clays. *Aust. J. Soil Res.*, 2:83-95, 1964.
- HOU, J.; EVANS, L.J. & SPIERS, G.A. Boron fractionation in soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 25:1841-1853, 1994.
- HOU, J.; EVANS, L.J. & SPIERS, G.A. Chemical fractionation of soil boron: I. Method development. *Can J. Soil Sci.*, 485-491, 1996.
- JACKSON, M.L. Analisis químico de suelos. 2.ed. Barcelona, Omega, 1970. 662p.
- JACOMINE, P.T.K.; ALMEIDA, J.C. & MEDEIROS, L.A.R. Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará. Recife, MA/DNPEA/SUDENE/DRN, 1973a. v.1. 301p. (Boletim Técnico, 28; Série Pedologia, 16)
- JACOMINE, P.T.K.; ALMEIDA, J.C. & MEDEIROS, L.A.R. Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará. Recife, MA/DNPEA/SUDENE/DRN, 1973b. v.2. 502p. (Boletim Técnico, 28; Série Pedologia, 16)
- JEFFREY, A.J. & McCALLURN, L.E. Investigation of a hot 0.01M CaCl_2 soil boron extraction procedure followed by ICP-AES analysis. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:663-673, 1988.
- JIN-YUN J.; MARTENS, D.C. & ZELAZNY, L.W. Distribution and plant availability of soil boron fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1228-1231, 1987.
- JIN-YUN J.; MARTENS, D.C. & ZELAZNY, L.W. Plant availability of applied and native boron in soils with diverse properties. *Plant Soil*, 105:127-132, 1988.
- KEREN, R. & BINGHAM, F.T. Boron in water, soil sand plants. In: ADVANCES IN SOIL SCIENCES. New York, Springer-Verlag Inc., New York, 1985. v.1, p.229-276.
- KEREN, R. & MEZUMAN, U. Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. *Clays Clay Miner.*, 29:198-204, 1981.
- KEREN, R.; GROSSI, P.R. & SPARKS, D.L. Equilibrium and kinetics of borate adsorption-desorption on pyrophyllite in aqueous suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1116-1122, 1994.
- LINDSAY, W.L. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: MORTEVEDT J.J., COX F.R., SHUMAN, L. M. & WELCH, R.M., eds. Micronutrients in agriculture. Madison, Soil Science Society of America, 1991. p.89-112.
- PARKER, D.R. & GARDNER, E.H. The determination of hot-water soluble boron in some acid Oregon soils using a modified azomethine-H procedure. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 12:1311-1322, 1981.
- PARKS, W.L. & WHITE, J.L. Boron retention by clay and humus systems saturated with various cations. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 16:298-300, 1952.
- PONNAMPERUMA, F.N.; CAYTON, M.T. & LANTIN, R.S. Dilute hydrochloric acid as an extractant for available zinc, copper and boron in rice soil. *Plant Soil*, 61:297-310, 1981.

- SHORROCKS, V.M. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant Soil*, 193:121-148, 1997
- SIMS, J.R. & BINGHAM, F.T. Retencion of boron by layer silicates, sesquioxides, and soil materials. II. Sesquioxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32:364-369, 1968.
- SPOUNCER, L.R.; NABLE, R.O. & CARTWIGHT, B. A procedure for the determination of soluble boron in soils ranging widely in boron concentrations, sodicity, and pH. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 23:441-453, 1992.
- TESSIER, A.; CAMPBELL, P.G.C. & BISSON, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.*, 51:844-851, 1979.
- TSADILAS, C.D.; YASSOGLU, N.; KOSMAS, C.S. & KALLIANOU, C.H. The availability of soil boron fractions to olive trees and barley and their relationships to soil properties. *Plant Soil*, 162:211-217, 1994.
- WOLF, B. The determination of boron in soil extracts, plant materials, composts, water and nutrient solutions. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 2:363-374, 1971.
- WOLF, B. Improvements in the azomethine-H method for determination of boron. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 5:39-44, 1974.
- YERMIYAHU, U.; KEREN, R. & CHEN, Y. Boron sorption on composted organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1309, 1988.