

BRUNO TORIBIO DE LIMA XAVIER

**ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE Cd, Cr, Ni e Pb EM SOLOS SATURADOS NA
CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DESTES METAIS PESADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2009

BRUNO TORIBIO DE LIMA XAVIER

**ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE Cd, Cr, Ni e Pb EM SOLOS SATURADOS NA
CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DESTES METAIS PESADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: em 23 de julho de 2009.

Prof. João Carlos Ker

Prof. Renildes Lúcio Ferreira Fontes

Dr. Juscimar da Silva

Prof. Reinaldo Bertola Cantarutti

Prof. Maurício Paulo Ferreira Fontes
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo amor e misericórdia incondicionais.

Aos meus pais José Carlos Duarte Xavier e Helena de Lima Xavier pelo exemplo, caráter, confiança e suporte de sempre.

À minha esposa Michelle e ao meu filho Lucas Toríbio, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos e à CAPES pela bolsa concedida.

Aos professores Maurício Paulo Ferreira Fontes e Raphael Bragança Alves Fernandes pela orientação e amizade.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	4
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	7
4. CONCLUSÕES	39
5. BIBLIOGRAFIA.....	40
ANEXO.....	44

RESUMO

XAVIER, Bruno Toribio de Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009. **Adsorção e Dessorção de Cd, Cr, Ni e Pb em solos saturados na capacidade máxima de adsorção destes metais pesados.** Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Coorientadores: Raphael Bragança Alves Fernandes e Clístenes Williams Araújo do Nascimento.

A poluição do ambiente e em especial do compartimento solo tem se configurado como um grande problema socioambiental, principalmente quando se refere à acumulação de determinados elementos químicos no solo. Identificar os mecanismos de adsorção, se o processo tende a ser mais específico ou eletrostático, ou até mesmo o comportamento de determinado metal quando outro já se encontra previamente adsorvido pode contribuir para o desenvolvimento de técnicas capazes de minimizar problemas ambientais causados pela disposição de resíduos ricos em metais pesados sobre o solo anteriormente. Os solos selecionados para este estudo pertencem às classes predominantes do Estado de Minas Gerais, quais sejam: Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos. Dentro das classes buscou-se trabalhar com horizontes A e B, que apresentassem características contrastantes em termos químicos e físicos. Amostras dos solos receberam doses equivalentes as capacidades máximas de adsorção (CMA) de Cd, Cr, Ni e Pb e foram mantidas incubadas por 30 dias. Os mesmos foram adicionados individualmente em cada amostra em quantidades equivalentes a 0; 0,5; 1 e 1,5 vezes a CMA que foi anteriormente determinada para cada metal e solo estudado. Solos incubados com doses equivalentes a CMA dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb e que receberam posteriormente as maiores doses destes mesmos metais apresentaram comportamento semelhante quando se analisa a adsorção nas diferentes doses crescentes adicionadas. Não houve correlação entre os valores adsorvidos dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb, em solos incubados com a CMA destes mesmos metais, com as classes de solos. Os metais pesados Cr e Pb foram os que desorveram maiores quantidades de metais previamente incubados nos solos estudados, sendo também os mais fortemente adsorvidos na mesma situação.

ABSTRACT

XAVIER, Bruno Toribio de Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2009. **Adsorption and Desorption of Cd, Cr, Ni and Pb in soils saturated at the maximum adsorption of heavy metals.** Adviser: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-advisers: Raphael Bragança Alves Fernandes and Clístenes Williams Araújo do Nascimento.

The pollution of the environment and in particular soil compartment has been configured as a great social and environmental problem, especially when it comes to the accumulation of certain chemicals in the soil. Identifying the mechanisms of adsorption, the process tends to be more specific or electrostatic, or even the behavior of certain metal while others are already previously adsorbed can contribute to the development of techniques to minimize environmental problems caused by waste disposal rich heavy metals on the soil above. The soils selected for this study belong to the dominant classes of the State of Minas Gerais, which are: Oxisols, Ultisols, Inceptisols and Entisols. Within the classes we tried to work with A and B horizons, which showed contrasting characteristics in terms of chemical and physical. Soil samples received doses equivalent to the maximum sorption capacities (CMA) of Cd, Cr, Ni and Pb were kept incubated for 30 days. They were added individually in each sample at concentrations of 0, 0.5, 1 and 1.5 times the CMA which was previously determined for each metal and soils. Incubated soils at rates equivalent to CMA heavy metals Cd, Cr, Ni, Pb and subsequently received the highest doses of these metals were similar when analyzing the adsorption at different increasing doses added. There was no correlation between the values of adsorbed heavy metals Cd, Cr, Ni and Pb in soils incubated with CMA these metals, with the soils. The heavy metals Cr and Pb were the highest amounts of metals desorb previously incubated in the soils, were the most strongly adsorbed in the same situation.

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ambiente e em especial do compartimento solo tem se configurado como um grande problema socioambiental, principalmente quando se refere à acumulação de determinados elementos químicos no solo. Os metais acumulam em solos devido a processos naturais e antrópicos como, por exemplo, deposição atmosférica oriunda de atividades industriais, disposição de lodo de esgoto, rejeitos ou subprodutos domésticos, utilização de fertilizantes e agrotóxicos. A concentração elevada de metais pesados no solo pode afetar a produtividade, biodiversidade e sustentabilidade dos ecossistemas, constituindo-se em risco para a saúde dos seres humanos e animais (Sun et al., 2001). A expressão metal pesado é largamente utilizada para classificar determinados elementos químicos como poluentes do ar, água, solo, plantas e alimentos. Metais pesados são aqueles elementos que apresentam densidade superior a 6 kg/dm^3 ou número atômico maior que 20 de acordo com Alloway (1995). A preocupação em relação ao comportamento dos metais pesados é fundamentada no fato de que é preciso maior conhecimento sobre a dinâmica destes elementos nos diferentes ambientes, bem como as interações que podem ocorrer entre os metais no solo. Metais pesados como, por exemplo, Cu, Zn e Co, ocorrem naturalmente nos solos e adicionalmente possuem relevante papel na nutrição de plantas e animais. Já outros, como Cd, Pb e As exercem efeitos negativos em vários componentes da biosfera (Alloway, 1995; Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

Reações com metais pesados nos solos são governadas por princípios que regem as interações de íons com as superfícies sólidas. Desta maneira, a adsorção, dessorção e a conseqüente biodisponibilidade dos metais pesados são controladas pelas características dos solos, tais como pH, potencial redox, teor de argila, matéria orgânica, presença de óxidos de Al, Fe e Mn e carbonato de cálcio (McLean e Bledsoe, 1992; Sparks, 1995; Rieuwerts et al. 1998; Krishnamurti et al., 1999). Quando um íon ou uma molécula presente na solução do solo reage com um grupo funcional de superfície, forma-se um complexo de superfície, sendo essa reação de formação denominada de complexação de superfície. Conforme a energia de ligação do íon com a superfície da partícula, os complexos de superfície podem se classificados como de esfera-externa e de esfera-interna. Um complexo de esfera-interna forma-se quando nenhuma molécula de água se interpõe entre o grupo funcional de superfície e o íon ou molécula que se liga a ele, isto é, o íon liga-se diretamente ao grupo funcional de

superfície, ocorrendo desta maneira, combinações de ligações covalentes (Stumm 1987 & Sposito 1994).

Ensaio têm sido desenvolvidos objetivando a compreensão dos processos que determinam a competição e adsorção de metais, na maioria das vezes adicionando-os ao solo em conjunto, o que resulta na determinação de seqüências de adsorção que ajudam a prever o comportamento destes metais e, por conseguinte seus comportamentos em sistemas multielementares. Matos et al. (1996) identificaram a seguinte seqüência de mobilidade para Latossolo Vermelho Amarelo: Zn>Cd>Cu>Pb. Para Fontes et al. (2000) a competição iônica foi fortemente influenciada pela capacidade de adsorção e mobilidade de cátions metálicos no solos respondendo diferentemente as equações de adsorção. Semelhantemente a este trabalho, Gomes et al. (2001) trabalhando com diversos solos de diferentes classes encontraram seqüência de afinidade de metais Cr>Pb>Cu>Cd>Zn>Ni, com Cr e Pb variando as posições bem como o Zn com o Ni. Gomes et al. (1997) estudando Cd, Cr, Cu, Ni e Pb concluíram que o Cr foi o metal que se associou às formas químicas mais estáveis. Fontes & Gomes (2003) em seus experimentos de adsorção, verificaram que ao aumentar as doses de concentração, Cr, Cu e Pb foram os metais mais adsorvidos à matriz dos solos, ao passo que, foram adsorvidos em menor quantidade Ni, Zn e Cd, indiferentemente das concentrações aplicadas e sugerem que os argissolos possuem maior capacidade de adsorver metais pesados quando comparados aos latossolos. Em síntese, diversos estudos têm demonstrado seqüências de afinidades de metais pelos sítios de adsorção disponíveis em diferentes solos, resíduos e outros materiais. Existe uma seqüência de adsorção mais comum para os solos, a saber: Cr~Pb>Cu>Zn>Ni>Cd. A literatura aponta mudanças de posição entre Cr e Pb e Ni e Cd (Matos et al., 1996; Gomes et al., 2001; Fontes & Gomes, 2003; Pierangeli et al., 2004; Basílio et al., 2005; Usman, 2008; Kamala-Kannan, 2008).

Para além das características químicas, também tem se dado importância as características físicas dos solos em relação ao comportamento adsorptivo de metais pesados. Moreira (2004), afirma que os solos com maiores capacidades de adsorção dos metais foram aqueles com textura argilosa e muito argilosa, enquanto que os menores valores de metais adsorvidos foram referentes aos solos de textura arenosa. Dados semelhantes foram obtidos por Suzuki et al. (2006), que observaram que os metais são adsorvidos no solo, em sua maioria na fração argilosa e que solos de textura areno-siltosa podem não adsorver metais pesados eficientemente quando colocados em contato com depósitos de lixo doméstico, levando a problemas de contaminação das águas subterrâneas de regiões próximas a estes depósitos, o que pode levar ao comprometimento da qualidade dos corpos d'água. Estas

constatações reforçam a necessidade de execução de novos ensaios com solos de mineralogias e textura contrastantes, com o intuito de incrementar as informações referentes ao processo de adsorção e competição de cátions em solos.

Informações acerca do comportamento de solos com elevados teores naturais de metais pesados ou contaminados por atividades antrópicas que recebem posteriormente carga poluente enriquecida com estes elementos podem contribuir para: identificação dos processos que levam os metais pesados a serem adsorvidos ou disponibilizados na solução do solo; desenvolvimento de técnicas capazes de minimizar problemas ambientais causados pela disposição de resíduos ricos em metais pesados sobre o solo e auxiliar a tomada de decisão em casos de intervenção para recuperação da qualidade destes solos. Entretanto, a dessorção ou biodisponibilização destes metais pesados anteriormente presentes nos solos têm sido pouco explorada nos trabalhos. Para nosso conhecimento este é o primeiro teste de competição/dessorção de metais pesados em solos previamente contaminados. O conhecimento destas reações é importante para a predição do destino final destes metais no ambiente. Este tipo de investigação se faz necessária, diante do acelerado processo de poluição dos solos com esses elementos, principalmente, devido à disposição de lodo de esgoto ou até mesmo resíduos de atividades mineradoras que podem contribuir para o enriquecimento dos solos com estes elementos ocasionando uma verdadeira incubação dos solos ao longo dos anos.

Neste contexto, o presente trabalho tem como meta responder a seguinte questão: como um metal pré-adsorvido se comporta ao adicionarmos individualmente outros metais em diferentes concentrações equivalentes a sua capacidade máxima de adsorção para cada solo estudado. Para isto, este trabalho procura avaliar a adsorção e a dessorção dos metais pesados: Cd, Cr, Ni e Pb em horizontes de solos representativos do Estado de Minas Gerais previamente incubados com a capacidade máxima de adsorção destes mesmos metais, estabelecendo relações entre este comportamento adsorptivo dos cátions com alguns atributos dos solos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os solos selecionados para o ensaio pertencem às classes predominantes do Estado de Minas Gerais, quais sejam: Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos. Dentro das classes buscou-se trabalhar com solos, horizontes A e B, que apresentassem características contrastantes em termos químicos e físicos (Quadros 1 e 2). As principais diferenças entre os solos escolhidos para o desenvolvimento do presente estudo foram: quantidade de argila, teor de matéria orgânica e valores de pH das amostras de solo. Os pontos de coleta estão inseridos em áreas sem influência ou alteração antrópica, tendo sido as amostras coletadas com ferramentas de inox e acondicionadas em sacos plásticos lacrados e identificados. Previamente às análises, as amostras foram secas à sombra, peneiradas em malha de 2 mm, homogeneizadas e identificadas. Após este procedimento, amostras de 500g destes solos receberam doses equivalentes as capacidades máximas de adsorção (CMA) de Cd, Cr, Ni e Pb (Ferreira et al, 2009) e foram mantidos incubados em capacidade de campo por 30 dias (Quadro 3).

Em subamostras de 2,00g de terra fina seca ao ar passada em peneira com abertura de malha de 2mm, proveniente dos solos incubados, foram adicionadas 20 mL de solução 0,01 mol L⁻¹ de NaNO₃ (relação 1:10) contendo diferentes concentrações iniciais de Cd, Cr, Ni e Pb em duplicata. Os metais foram adicionados individualmente em cada amostra através de soluções de Ni(NO₃)₂, Cd(NO₃)₂, Pb(NO₃)₂ e Cr(NO₃)₃. Estas quantidades foram equivalentes a 0; 0,5; 1 e 1,5 vezes a capacidade máxima de adsorção que foi anteriormente determinada para cada metal e solo estudado. O conjunto solo-solução foi acondicionado em tubos de polietileno com capacidade para 50 mL, agitado durante 24 horas consecutivas em agitador horizontal a 120 g. Após a agitação, as suspensões passaram por centrifugação a 2500 g durante 5 minutos, tendo sido o sobrenadante filtrado em papel de filtro quantitativo e coletado para determinação do teor dos metais por espectrofotometria de absorção atômica de chama. A quantidade de metal adsorvida foi calculada pela diferença entre a quantidade de metal adicionada e a quantidade remanescente na solução de equilíbrio. Os resultados foram apresentados e discutidos utilizando o procedimento estatístico multivariado análise de agrupamento processado no software STATISTICA versão 7.0 (Statsoft, 2004).

Quadro 1. Caracterização química e física das amostras de solos

Solos*	Horizonte	pH		P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTCe	CTCt	V	m
		H ₂ O	KCl											
				---mg dm ⁻³ ---	-----cmolc dm ⁻³ -----				-----%-----					
PVA1 (1)	A	7.19	6.46	5.69	323.17	13.29	3.00	0.05	0.69	17.12	17.17	17.81	96.12	0.30
PVA2 (2)	A	5.19	4.21	7.30	93.05	1.40	0.55	0.51	3.90	2.19	2.69	6.09	35.93	18.78
PVA3 (3)	A	5.61	4.80	0.62	57.18	1.13	0.50	0.05	1.45	1.78	1.83	3.23	55.11	2.81
LVA1 (4)	A	4.94	4.29	0.56	60.36	0.86	0.26	0.51	3.66	1.27	1.78	4.93	25.78	28.47
LVA2 (5)	A	6.71	5.55	2.47	177.91	2.56	0.78	0.01	0.84	3.79	3.80	4.63	81.82	0.16
LV1 (6)	A	4.50	4.05	2.13	54.00	0.66	0.15	2.23	9.96	0.95	3.19	10.92	8.72	70.11
LV2 (7)	A	5.97	4.38	1.58	128.90	1.13	1.21	0.23	2.21	2.67	2.90	4.87	54.74	8.04
CX1 (8)	A	5.19	3.95	1.54	80.09	0.74	0.18	1.57	2.08	1.12	2.69	3.21	34.97	58.29
CX2 (9)	A	5.73	5.06	2.28	161.57	7.75	1.20	0.08	1.90	9.36	9.44	11.26	83.10	0.87
RQ1 (10)	A	4.96	4.10	3.24	18.14	0.15	0.13	0.75	1.45	0.32	1.07	1.77	18.28	69.78
PVA1 (11)	B	5.66	4.65	0.52	76.91	2.30	0.55	0.11	2.21	3.04	3.16	5.25	57.98	3.55
PVA2 (12)	B	4.60	3.86	2.20	40.85	0.41	0.29	1.05	2.05	0.81	1.86	2.87	28.32	56.43
PVA3 (13)	B	5.47	5.18	0.89	11.57	0.86	0.53	0.05	1.08	1.42	1.47	2.51	56.70	3.50
LVA1 (14)	B	4.98	4.83	0.25	8.38	0.00	0.04	0.11	2.08	0.06	0.17	2.14	2.74	65.62
LVA2 (15)	B	5.85	4.62	0.98	56.43	2.77	0.42	0.04	0.93	3.33	3.37	4.27	78.13	1.08
LV1 (16)	B	4.81	4.34	0.52	37.66	0.23	0.06	0.84	6.33	0.38	1.22	6.71	5.72	68.63
LV2 (17)	B	4.84	4.06	0.92	14.96	0.07	0.07	1.54	2.08	0.17	1.71	2.26	7.70	89.83
CX1 (18)	B	5.22	3.87	0.36	41.05	0.43	0.08	4.93	3.54	0.62	5.55	4.16	14.84	88.88
CX2 (19)	B	6.12	5.12	1.87	122.53	8.83	0.99	0.02	1.60	10.13	10.16	11.73	86.37	0.21

PVA: Argissolo Vermelho Amarelo, CX: Cambissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, LVA: Latossolo Vermelho Amarelo, RQ: Neossolo Quartzarênico, nomenclatura de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). (P; K) Mehlich-1 (De Filippo & Ribeiro, 1997). (Ca²⁺; Mg²⁺; Al³⁺) KCl 1 mol L⁻¹ (De Filippo & Ribeiro, 1997). (H+Al) CaOAc 0,5 mol L⁻¹ (De Filippo & Ribeiro, 1997).

Quadro 2. Caracterização química e física das amostras de solos

Solos*	Horizonte	MO dag kg ⁻¹	P-rem mg L ⁻¹	Zn	Fe	Mn	Cu	S	Argila kg kg ⁻¹
PVA1 (1)	A	10.82	37.18	7.63	23.87	228.97	0.25	0.00	22
PVA2 (2)	A	4.98	19.14	4.19	62.28	149.65	0.07	15.43	25
PVA3 (3)	A	2.54	19.55	0.66	125.05	120.27	3.07	4.64	43
LVA1 (4)	A	4.64	10.06	2.48	139.93	32.63	3.89	5.10	64
LVA2 (5)	A	1.79	38.60	1.57	18.31	88.36	0.14	3.04	11
LV1 (6)	A	13.98	3.88	1.12	80.55	11.35	0.26	0.00	65
LV2 (7)	A	1.96	26.52	1.68	127.62	85.05	0.97	1.89	14
CX1 (8)	A	1.79	26.06	1.39	180.05	18.70	0.42	20.48	17
CX2 (9)	A	3.11	31.60	4.80	21.92	217.03	1.39	2.12	35
RQ1 (10)	A	1.27	38.68	1.86	22.69	5.49	0.86	40.67	7
PVA1 (11)	B	2.04	13.34	1.03	119.01	85.37	3.09	1.89	40
PVA2 (12)	B	1.35	28.60	0.67	105.61	9.38	0.00	16.34	44
PVA3 (13)	B	0.79	8.06	0.47	45.93	11.06	1.91	22.77	66
LVA1 (14)	B	1.55	4.91	0.16	38.38	3.08	2.10	0.00	68
LVA2 (15)	B	0.93	35.34	1.14	14.30	36.00	0.91	7.40	27
LV1 (16)	B	5.59	2.91	0.29	85.10	4.43	0.60	0.00	83
LV2 (17)	B	0.73	14.39	0.35	98.93	12.82	0.71	13.36	17
CX1 (18)	B	0.83	14.60	0.77	59.36	1.61	0.19	14.97	19
CX2 (19)	B	3.83	29.19	4.63	16.13	161.57	1.09	6.25	39

PVA: Argissolo Vermelho Amarelo, CX: Cambissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, LVA: Latossolo Vermelho Amarelo, RQ: Neossolo Quartzarênico, nomenclatura de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999); (Zn; Fe; Mn; Cu): Mehlich-1 (De Filippo & Ribeiro, 1997); (MO): Walkley-Black (De Filippo & Ribeiro, 1997); (P-rem): Alvarez V. et al. (2000); (Argila): Ruiz (2005).

As principais diferenças entre os solos escolhidos para o desenvolvimento do presente estudo foram: quantidade de argila, teor de matéria orgânica e valores de pH das amostras de solo.

Quadro 3. Capacidades Máximas de Adsorção (mmol kg^{-1}) de Cd, Ni, Cr e Pb utilizadas na incubação prévia dos solos

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO	Cd	Ni	Cr	Pb	SOLO	Cd	Ni	Cr	Pb
1	140.75	133.30	116.26	156.42	11	17.21	26.36	18.26	22.66
2	8.96	15.35	12.82	19.86	12	5.02	12.48	4.51	7.99
3	8.38	15.82	10.35	15.88	13	12.43	24.14	10.19	19.24
LATOSSOLO									
4	7.13	15.82	16.76	10.72	14	4.95	7.58	6.62	9.62
5	20.48	21.12	10.46	21.36	15	16.57	29.19	29.97	16.69
6	8.95	42.68	65.70	49.56	16	6.04	11.48	17.80	16.32
7	10.43	15.70	11.55	10.52	17	3.22	9.94	9.86	10.65
CAMBISSOLO									
8	4.84	8.43	9.60	12.88	18	5.38	15.93	8.80	9.29
9	22.07	44.51	40.69	46.78	19	36.18	53.35	34.75	47.65
NEOSSOLO									
10	2.89	5.56	4.30	3.24					

PVA1 (1); PVA2 (2); PVA3 (3); LVA1 (4); LVA2 (5); LV1 (6); LV2 (7); CX1 (8); CX2 (9); RQ1 (10); PVA1 (11); PVA2 (12); PVA3 (13); LVA1 (14); LVA2 (15); LV1 (16); LV2 (17); CX1 (18); CX2 (19). PVA: Argissolo Vermelho Amarelo, CX: Cambissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, LVA: Latossolo Vermelho Amarelo, RQ: Neossolo Quartzarênico, nomenclatura de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999); Fonte: Ferreira et al. (2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das leituras dos metais previamente incubados em função da adição posterior de outros metais no sistema indica a capacidade do segundo metal de deslocar o primeiro, sendo assim, pode-se inferir se eles concorrem pelos mesmos sítios ou sobre os mecanismos de adsorção de cada um dos metais em questão. Neste caso, um aumento da adsorção do segundo mediante um não incremento do primeiro na solução, indicaria que os sítios de adsorção dos metais seriam diferentes. No presente estudo, os metais adicionados proporcionaram doses aplicadas equivalentes e até mesmo superiores as doses utilizadas para a incubação do primeiro metal. O pH dos solos estudados sofreram maiores reduções com a adição dos metais Cr e Pb e menores com a adição de Cd e Ni. É sabido que a adsorção de metais é um processo bastante influenciado pelo ao pH do solo (Rieuwerts et al., 1998), sendo que a diminuição do pH favorece a formação de cátions metálicos livres e o aumento do pH favorece a formação de complexos metálicos (Sobrinho et al, 2009).

3.1. Solos incubados com Cd

Observou-se que os metais Pb e Cr foram os mais adsorvidos seguidos pelo Ni em solos previamente incubados com doses equivalentes a capacidade máxima de adsorção de Cd, sendo a seqüência Pb~Cr>Ni a mais comum para a maioria dos solos estudados (Figura 1). Este resultado demonstra a equivalência de mecanismos de adsorção para o Pb e Cr em contraponto ao mecanismo pelo qual o Ni é adsorvido, ou se estes metais são adsorvidos através do mesmo mecanismo a força com que o Cr e o Pb são adsorvidos é superior a do Ni. De uma maneira geral, maiores quantidades adicionadas acarretaram maiores adsorções dos metais. Quando houve predominância de adsorção de Cr em relação ao Pb, esta ocorreu, prioritariamente nos latossolos. Este comportamento pode estar relacionado ao fato dos latossolos oferecerem mais sítios específicos de adsorção, sendo o Cr então mais fortemente adsorvido do que o Pb nestas condições. A literatura aponta que metais trivalentes, como é o caso do Cr, devem ser preferencialmente adsorvidos sobre todos os metais divalentes (McBride, 1994).

O Cd foi desorvido em consequência da adição posterior de doses crescentes individuais de Cr, Pb e Ni (Figura 2). De uma maneira geral, maiores doses adicionadas do segundo metal ocasionaram maior desorção do Cd. Pb, Cr e Ni, nesta ordem, foram os metais que provocaram as maiores desorções de Cd nos solos estudados. Nas amostras 7, 9, 10, 11, 13, 15 16 e 19, 80%, em média, do Cd previamente incubado continuou adsorvido após a adição de 1,5 vezes a quantidade equivalente a capacidade máxima de adsorção de Pb. Este comportamento pode indicar que o Pb está sendo adsorvido por outros sítios que não os mesmos já ocupados pelo Cd.

As correlações observadas entre a quantidade de metal adsorvida em solos incubados com Cd e as características físico-químicas destes solos, indicam que houve grande semelhança entre os comportamentos adsorptivos dos solos incubados com Cd e que receberam doses crescentes e individuais de Cr, Pb e Ni. As adsorções de Pb e Cr não se correlacionaram apenas com a saturação por alumínio. Observou-se uma correlação positiva entre o conteúdo da matéria orgânica do solo, atributo que confere aos solos grande afinidade por cátions (Hodgson, 1963), com o comportamento adsorptivo de Cr, Pb e Ni em solos previamente incubados com a capacidade máxima de adsorção de Cd.



Figura 1. Adsorção de Cr, Pb e Ni em solos previamente incubados com doses equivalentes a Capacidade Máxima de Adsorção de Cd.

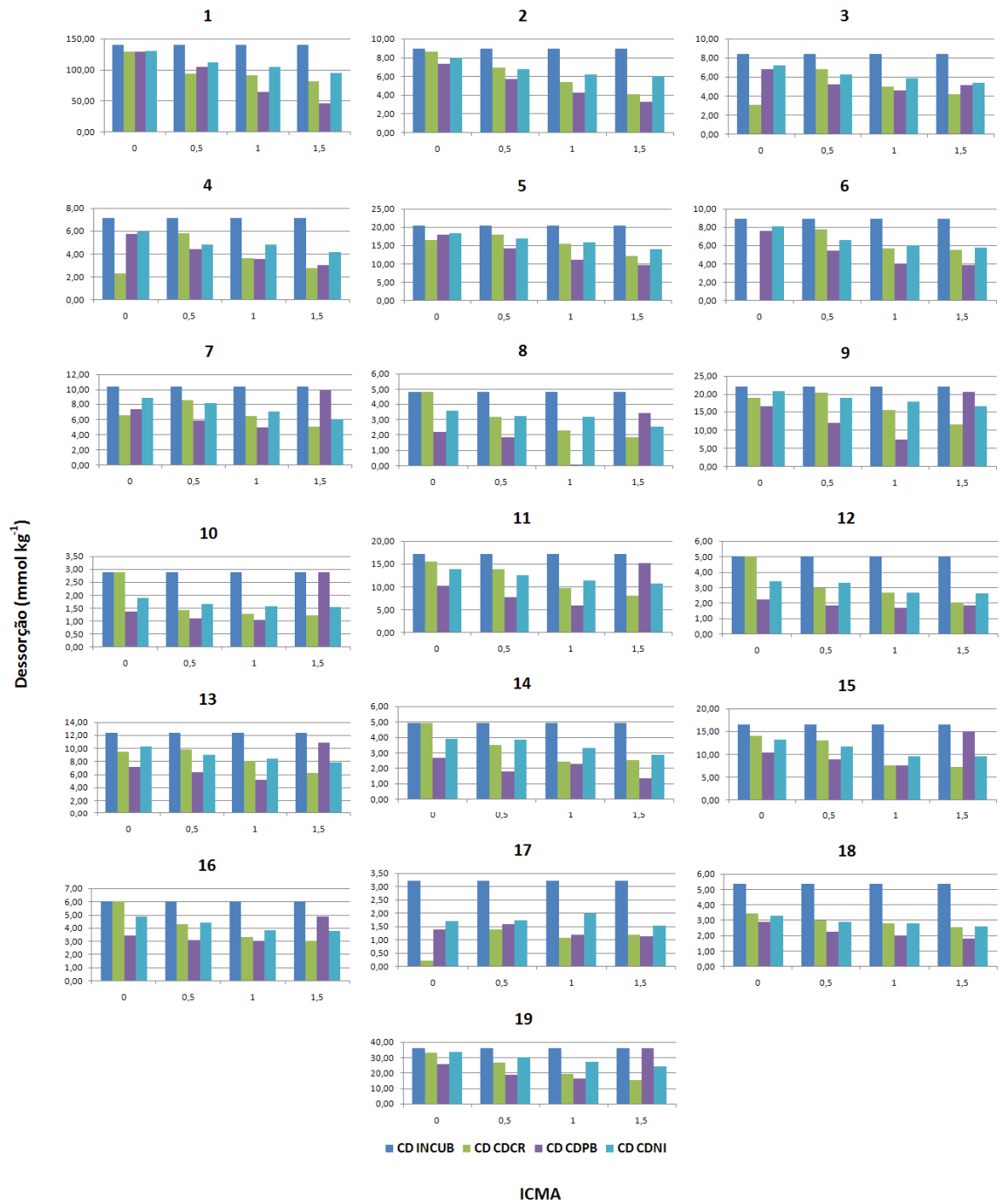


Figura 2. Dessorção do Cd previamente incubado em decorrência da aplicação de doses crescentes de Cr, Pb e Ni.

As correlações observadas entre a quantidade de metal adsorvida em solos incubados com Cd e as características físico-químicas destes solos (Quadro 4), indicam que houve grande semelhança entre os comportamentos adsortivos dos solos incubados com Cd e que receberam doses crescentes e individuais de Cr, Pb e Ni. As adsorções de Pb e Cr não se correlacionaram apenas com a saturação por alumínio. Observou-se uma correlação positiva entre o conteúdo da matéria orgânica do solo, atributo que confere aos solos grande afinidade por cátions (Hodgson, 1963), com o comportamento adsortivo de Cr, Pb e Ni em solos previamente incubados com a capacidade máxima de adsorção de Cd.

Quadro 4. Matriz de correlação de Pearson com valores significativos ($p < 0,01$) de Cr, Pb e Ni adsorvido em solos incubados com CMA de Cd e atributos do solo.

ATRIBUTOS	CR CDCR	PB CDPB	NI CDNI
pH H₂O	0,35	0,46	0,53
pH KCl	0,44	0,54	0,59
K	0,53	0,61	0,66
Ca	0,58	0,66	0,72
Mg	0,56	0,64	0,70
SB	0,59	0,67	0,72
CTC_{efetiva}	0,60	0,67	0,72
CTC_{total}	0,67	0,68	0,69
V	0,32	0,42	0,50
MO	0,58	0,50	0,43

Com relação às classes de solos utilizadas no experimento, observou-se que a adsorção de cromo, chumbo e níquel em argissolos previamente incubados com Cd (Quadro 5), resultou na seqüência geral de adsorção Cr>Pb>Ni. O comportamento observado para os latossolos indica uma maior adsorção do cromo, seguido do chumbo e do níquel (Cr>Pb>Ni), sendo esta, de forma geral, a mesma seqüência de adsorção dos metais pesados utilizados para os cambissolos e neossolos estudados. Este comportamento não diferiu entre os solos nem entre os horizontes destes.

Quadro 5. Porcentagens de Cr, Pb e Ni adsorvidos em solo previamente incubado com a CMA de Cd

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Cr	% Pb	% Ni	Sequência de afinidade	SOLO/DOSE¹	% Cr	% Pb	% Ni	Sequência de afinidade
1.2	97	96	65	Cr>Pb>Ni	11.2	89	94	44	Pb>Cr>Ni
1.3	86	91	53	Pb>Cr>Ni	11.3	100	85	41	Cr>Pb>Ni
1.4	72	73	41	Pb>Cr>Ni	11.4	82	75	28	Cr>Pb>Ni
2.2	98	89	60	Cr>Pb>Ni	12.2	100	69	51	Cr>Pb>Ni
2.3	75	84	50	Pb>Cr>Ni	12.3	100	76	33	Cr>Pb>Ni
2.4	82	76	46	Cr>Pb>Ni	12.4	92	68	30	Cr>Pb>Ni
3.2	100	91	54	Cr>Pb>Ni	13.2	100	84	41	Cr>Pb>Ni
3.3	100	82	45	Cr>Pb>Ni	13.3	100	76	38	Cr>Pb>Ni
3.4	100	63	36	Cr>Pb>Ni	13.4	94	71	35	Cr>Pb>Ni
LATOSSOLO									
4.2	33	85	50	Pb>Ni>Cr	14.2	93	87	66	Cr>Pb>Ni
4.3	90	86	40	Cr>Pb>Ni	14.3	100	73	57	Cr>Pb>Ni
4.4	76	75	34	Cr>Pb>Ni	14.4	100	72	21	Cr>Pb>Ni
5.2	73	93	50	Pb>Cr>Ni	15.2	100	87	41	Cr>Pb>Ni
5.3	95	82	44	Cr>Pb>Ni	15.3	81	80	40	Cr>Pb>Ni
5.4	97	72	40	Cr>Pb>Ni	15.4	60	71	31	Pb>Cr>Ni
6.2	100	85	40	Cr>Pb>Ni	16.2	100	81	65	Cr>Pb>Ni
6.3	87	79	30	Cr>Pb>Ni	16.3	93	78	18	Cr>Pb>Ni
6.4	73	71	32	Cr>Pb>Ni	16.4	100	73	30	Cr>Pb>Ni
7.2	88	87	59	Cr>Pb>Ni	17.2	100	64	62	Cr>Pb>Ni
7.3	100	88	45	Cr>Pb>Ni	17.3	100	57	15	Cr>Pb>Ni
7.4	92	84	42	Cr>Pb>Ni	17.4	90	57	29	Cr>Pb>Ni
CAMBISSOLO									
8.2	82	85	44	Pb>Cr>Ni	18.2	100	64	59	Cr>Pb>Ni
8.3	86	66	45	Cr>Pb>Ni	18.3	100	58	27	Cr>Pb>Ni
8.4	91	78	41	Cr>Pb>Ni	18.4	96	60	24	Cr>Pb>Ni
9.2	98	95	64	Cr>Pb>Ni	19.2	100	95	50	Cr>Pb>Ni
9.3	92	93	54	Pb>Cr>Ni	19.3	91	88	47	Cr>Pb>Ni
9.4	84	82	51	Cr>Pb>Ni	19.4	83	78	44	Cr>Pb>Ni
NEOSSOLO									
10.2	70	93	40	Pb>Cr>Ni					
10.3	100	76	0	Cr>Pb>Ni					
10.4	100	65	0	Cr>Pb>Ni					

¹ Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA

Quadro 6. Porcentagens de Cd que permanece adsorvido por ocasião da aplicação de diferentes concentrações de Cr, Pb e Ni em solo previamente incubado com a CMA de Cd

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Cd (Cr)²	% Cd (Pb)²	% Cd (Ni)²	Sequência de força de dessorção	SOLO/ DOSE¹	% Cd (Cr)²	% Cd (Pb)²	% Cd (Ni)²	Sequência de força de dessorção
1.1	92	92	93	Pb>Cr>Ni	11.1	90	60	81	Pb>Ni>Cr
1.2	67	74	79	Cr>Pb>Ni	11.2	81	46	73	Pb>Ni>Cr
1.3	65	46	74	Pb>Cr>Ni	11.3	57	34	67	Pb>Cr>Ni
1.4	58	33	68	Pb>Cr>Ni	11.4	47	88	63	Cr>Ni>Pb
2.1	96	82	88	Pb>Ni>Cr	12.1	100	45	68	Pb>Ni>Cr
2.2	78	64	76	Pb>Ni>Cr	12.2	59	37	66	Pb>Cr>Ni
2.3	61	47	70	Pb>Cr>Ni	12.3	54	34	53	Pb>Ni>Cr
2.4	46	37	68	Pb>Cr>Ni	12.4	41	37	52	Pb>Cr>Ni
3.1	37	81	86	Cr>Pb>Ni	13.1	76	57	82	Pb>Cr>Ni
3.2	82	62	75	Pb>Ni>Cr	13.2	80	51	72	Pb>Ni>Cr
3.3	59	55	70	Pb>Cd>Ni	13.3	65	42	68	Pb>Cr>Ni
3.4	50	62	64	Cr>Pb>Ni	13.4	50	88	64	Cr>Ni>Pb
LATOSSOLO									
4.1	33	81	83	Cr>Pb>Ni	14.1	100	54	79	Pb>Ni>Cr
4.2	81	62	68	Pb>Ni>Cr	14.2	71	36	78	Pb>Cr>Ni
4.3	51	50	67	Pb>Cr>Ni	14.3	49	46	68	Pb>Cr>Ni
4.4	39	43	59	Cr>Pb>Ni	14.4	51	27	59	Pb>Cr>Ni
5.1	81	87	90	Cr>Pb>Ni	15.1	85	63	80	Pb>Ni>Cr
5.2	88	70	82	Pb>Ni>Cr	15.2	78	53	71	Pb>Ni>Cr
5.3	75	54	78	Pb>Cr>Ni	15.3	46	46	57	Cr>Pb>Ni
5.4	60	48	68	Pb>Cr>Ni	15.4	44	91	57	Cr>Ni>Pb
6.1	1	85	91	Cr>Pb>Ni	16.1	100	57	80	Pb>Ni>Cr
6.2	86	61	74	Pb>Ni>Cr	16.2	71	52	73	Pb>Cr>Ni
6.3	63	46	67	Pb>Cr>Ni	16.3	55	50	64	Pb>Cr>Ni
6.4	62	44	64	Pb>Cr>Ni	16.4	50	81	62	Cr>Ni>Pb
7.1	62	71	84	Cr>Pb>Ni	17.1	7	43	53	Cr>Pb>Ni
7.2	82	56	78	Pb>Cr>Ni	17.2	44	49	54	Cr>Pb>Ni
7.3	62	48	67	Pb>Cr>Ni	17.3	33	37	62	Cr>Pb>Ni
7.4	48	95	58	Cr>Ni>Pb	17.4	37	35	48	Pb>Cr>Ni

Continua

CAMBISSOLO

8.1	100	45	74	Pb>Ni>Cr	18.1	64	54	61	Pb>Ni>Cr
8.2	65	38	67	Pb>Ni>Cr	18.2	56	42	54	Pb>Ni>Cr
8.3	47	2	66	Pb>Cr>Ni	18.3	52	38	52	Pb>Cr=Ni
8.4	39	71	53	Cr>Ni>Pb	18.4	47	34	48	Pb>Cr>Ni
9.1	86	75	94	Pb>Cr>Ni	19.1	91	72	93	Pb>Cr>Ni
9.2	93	54	86	Pb>Ni>Cr	19.2	73	52	83	Pb>Cr>Ni
9.3	70	34	81	Pb>Cr>Ni	19.3	53	45	75	Pb>Cr>Ni
9.4	53	94	75	Cr>Ni>Pb	19.4	43	100	67	Cr>Ni>Pb

NEOSSOLO

10.1	100	48	65	Pb>Ni>Cr
10.2	50	38	58	Pb>Cr>Ni
10.3	44	36	54	Pb>Cr>Ni
10.4	42	100	54	Cr>Ni>Pb

¹ Dose 1 - Adição de 0x da CMA; Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA; ² Porcentagem de Cd que permaneceu adsorvido após aplicação de doses crescentes de Cr, Pb e Ni.

3.2. Solos Incubados com Cr

Na maior parte dos solos estudados, o metal pesado Pb foi aquele que se manteve mais adsorvido em comparação ao Cd e ao Ni em solos incubados com Cr. Nos solos onde se observa a preferência na adsorção de Pb sobre o Cádmiio alguns autores observaram que a preferência ao Pb pode ser atribuída devido ao menor tamanho do seu raio iônico hidratado (Pb = 0,401nm e Cd = 0,426nm) (Gao et al.,1997; Pardo, 2000; Phillips, 1999), além da grande afinidade do Pb por grupos funcionais da matéria orgânica como grupos fenólicos e carboxílicos. O fato do Pb ser mais eletronegativo que o Cd (2,10 e 1,69 respectivamente para Pb e Cd) e possuir um pK (7,78 para Pb e 11,70 para Cd) faz do Cd um metal de características adsorptivas mais eletrostáticas em reações que envolvem complexação por esfera interna (Huheey, 1983; McBride, 1994). Maiores quantidades de metais pesados adicionados em solução proporcionaram maiores adsorções destes metais nas diferentes doses aplicadas. O fato do Ni ser mais adsorvido do que o Cd em solos previamente incubados com Cr, pode ter explicação no fato do Ni ser adsorvido por mecanismo não específico ou eletrostático. Na dose de incubação mais elevada de Cr (116,26 mmol kg⁻¹) o Cd não foi adsorvido conforme observado para os demais solos utilizados, o que indica que este metal pode ser facilmente lixiviado caso entre em contato com um solo que tenha altos valores de Cr adsorvido em sua matriz, configurando-se desta forma em importante problema ambiental. O Pb é o metal que consegue dessorver mais o Cr previamente incubado.



Figura 3. Adsorção de Cd, Ni e Pb em solos previamente incubados com doses equivalentes a Capacidade Máxima de Adsorção de Cr.

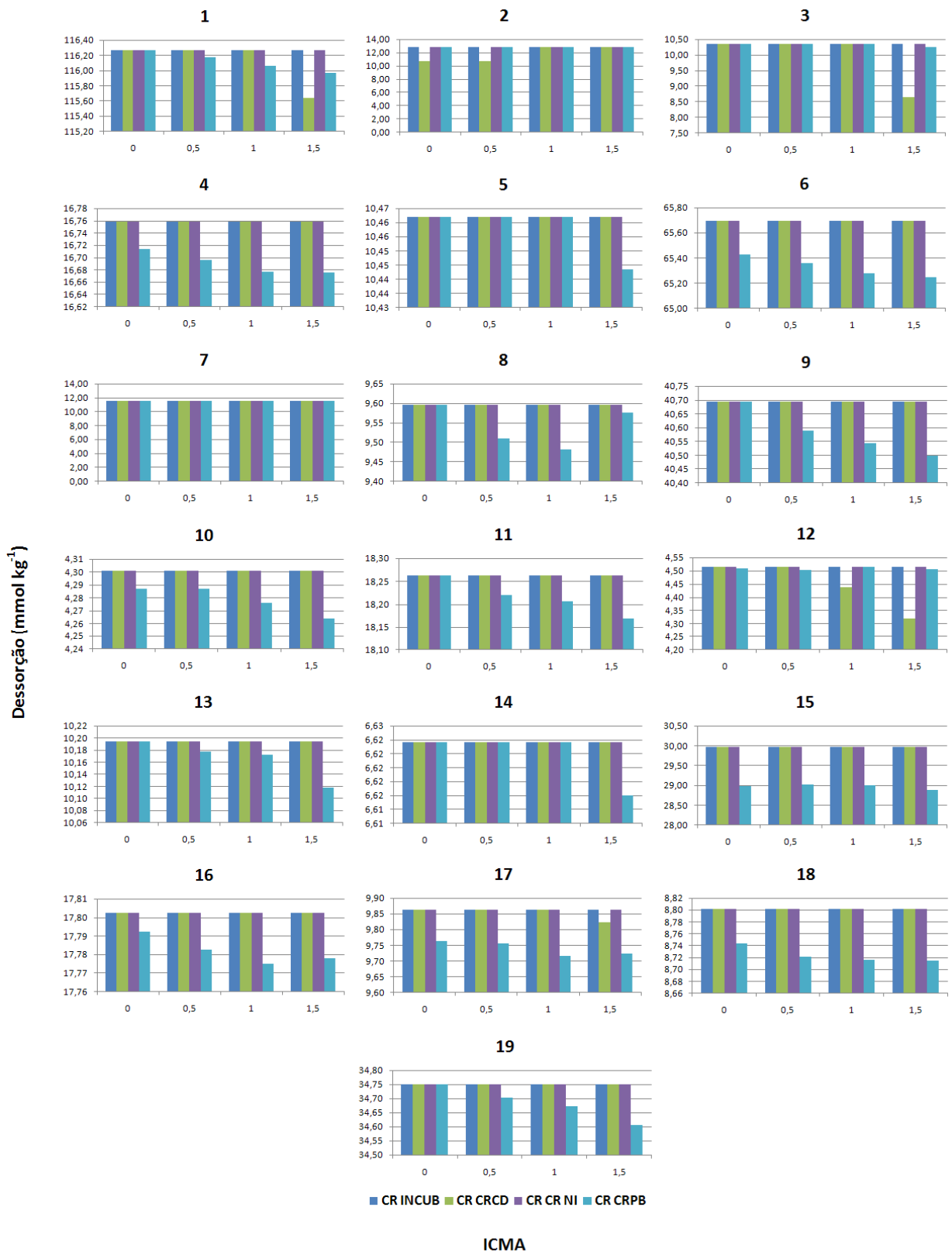


Figura 4. Dessorção do Cr previamente incubado em decorrência da aplicação de doses crescentes de Cd, Ni e Pb.

As correlações observadas entre a quantidade de metal adsorvida em solos incubados com Cr e as características físico-químicas destes solos (Quadro 7), indicam que houve grande semelhança entre os comportamentos adsorptivos dos solos incubados com Cr e que receberam doses crescentes e individuais de Ni e Pb. A adsorção de Cd não teve correlação com nenhum dos atributos selecionados.

Quadro 7. Matriz de correlação de Pearson com valores significativos ($p < 0,01$) de Cd, Ni e Pb adsorvido em solos incubados com CMA de Cr e atributos do solo.

ATRIBUTOS	CD CRCD	NI CRNI	PB CRPB
pH H₂O	-	0,53	0,46
pH KCl	-	0,59	0,55
K	-	0,63	0,60
Ca	-	0,67	0,65
Mg	-	0,68	0,61
SB	-	0,68	0,65
CTC_{efetiva}	-	0,68	0,65
CTC_{total}	-	0,65	0,68
V	-	0,49	0,43
MO	-	0,44	0,51

Em solos incubados com a Capacidade Máxima de Adsorção de cromo (Quadro 8), a seqüência de adsorção de metais pesados mais observada nos Argissolos, Latossolos, Cambissolos e Neossolo estudados foi chumbo, cádmio e níquel (Pb>Cd>Ni).

Quadro 8. Porcentagens de Cd, Ni e Pb adsorvidos em solo previamente incubado com a CMA de Cr

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Cd	% Ni	% Pb	Sequência de afinidade	SOLO/ DOSE¹	% Cd	% Ni	% Pb	Sequência de afinidade
1.2	2	45	83	Pb>Ni>Cd	11.2	45	40	68	Pb>Cd>Ni
1.3	0	33	50	Pb>Ni>Cd	11.3	37	33	67	Pb>Cd>Ni
1.4	0	26	32	Pb>Ni>Cd	11.4	0	30	61	Pb>Ni>Cd
2.2	31	38	66	Pb>Ni>Cd	12.2	39	33	54	Pb>Cd>Ni
2.3	40	31	67	Pb>Cd>Ni	12.3	50	30	56	Pb>Cd>Ni
2.4	28	29	66	Pb>Ni>Cd	12.4	40	33	66	Pb>Cd>Ni
3.2	52	41	69	Pb>Cd>Ni	13.2	52	42	73	Pb>Cd>Ni
3.3	37	34	69	Pb>Cd>Ni	13.3	50	39	72	Pb>Cd>Ni
3.4	52	31	55	Pb>Cd>Ni	13.4	46	36	72	Pb>Cd>Ni
LATOSSOLO									
4.2	31	20	49	Pb>Cd>Ni	14.2	51	24	67	Pb>Cd>Ni
4.3	40	29	59	Pb>Cd>Ni	14.3	49	21	64	Pb>Cd>Ni
4.4	44	28	59	Pb>Cd>Ni	14.4	58	15	70	Pb>Cd>Ni
5.2	69	51	84	Pb>Cd>Ni	15.2	53	25	42	Cd>Pb>Ni
5.3	45	43	75	Pb>Cd>Ni	15.3	25	25	40	Pb>Cd>Ni
5.4	54	40	65	Pb>Cd>Ni	15.4	0	22	32	Pb>Ni>Cd
6.2	31	31	66	Pb>Cd>Ni	16.2	31	15	67	Pb>Cd>Ni
6.3	48	25	57	Pb>Cd>Ni	16.3	39	7	71	Pb>Cd>Ni
6.4	38	29	44	Pb>Cd>Ni	16.4	27	24	68	Pb>Cd>Ni
7.2	6	35	62	Pb>Ni>Cd	17.2	4	11	44	Pb>Ni>Cd
7.3	4	38	66	Pb>Ni>Cd	17.3	24	14	44	Pb>Cd>Ni
7.4	0	32	61	Pb>Ni>Cd	17.4	35	25	49	Pb>Cd>Ni
CAMBISSOLO									
8.2	51	23	45	Cd>Pb>Ni	18.2	23	20	49	Pb>Cd>Ni
8.3	55	21	54	Cd>Pb>Ni	18.3	18	28	56	Pb>Ni>Cd
8.4	27	25	68	Pb>Cd>Ni	18.4	35	25	53	Pb>Cd>Ni
9.2	74	41	72	Cd>Pb>Ni	19.2	43	33	81	Pb>Cd>Ni
9.3	41	28	57	Pb>Cd>Ni	19.3	0	28	64	Pb>Ni>Cd
9.4	13	28	50	Pb>Ni>Cd	19.4	0	27	51	Pb>Ni>Cd
NEOSSOLO									
10.2	16	11	31	Pb>Cd>Ni					
10.3	41	13	58	Pb>Cd>Ni					
10.4	36	18	43	Pb>Cd>Ni					

¹ Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA

Quadro 9. Porcentagens de Cr que permanece adsorvido por ocasião da aplicação de diferentes concentrações de Cd, Ni e Pb em solo previamente incubado com a CMA de Cr

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Cr (Cd)²	% Cr (Ni)²	% Cr (Pb)²	Sequência de força de dessorção	SOLO/ DOSE¹	% Cr (Cd)²	% Cr (Ni)²	% Cr (Pb)²	Sequência de força de dessorção
1.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb	11.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb
1.2	100	100	99.9	Pb>Cd=Ni	11.2	100	100	99.77	Pb>Cd=Ni
1.3	100	100	99.8	Pb>Cd=Ni	11.3	100	100	99.70	Pb>Cd=Ni
1.4	99.5	100	99.8	Cd>Pb>Ni	11.4	100	100	99.49	Pb>Cd=Ni
2.1	83.8	100	100	Cd>Ni=Pb	12.1	100	100	99.89	Pb>Cd=Ni
2.2	83.2	100	100	Cd>Pb>Ni	12.2	100	100	99.77	Pb>Cd=Ni
2.3	100	100	99.8	Pb>Cd=Ni	12.3	98.29	100	100	Cd>Ni=Pb
2.4	100	100	99.8	Pb>Cd=Ni	12.4	95.74	100	99.82	Cd>Pb>Ni
3.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb	13.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb
3.2	100	100	100	Pb>Cd=Ni	13.2	100	100	99.84	Pb>Cd=Ni
3.3	100	100	99.9	Pb>Cd=Ni	13.3	100	100	99.78	Pb>Cd=Ni
3.4	83.6	100	98.9	Cd>Pb>Ni	13.4	100	100	99.25	Pb>Cd=Ni
LATOSSOLO									
4.1	100	100	99.74	Pb>Cd=Ni	14.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb
4.2	100	100	99.63	Pb>Cd=Ni	14.2	100	100	100	Cd=Ni=Pb
4.3	100	100	99.52	Pb>Cd=Ni	14.3	100	100	100	Cd=Ni=Pb
4.4	100	100	99.51	Pb>Cd=Ni	14.4	100	100	99.88	Pb>Cd=Ni
5.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb	15.1	100	100	96.70	Pb>Cd=Ni
5.2	100	100	100	Cd=Ni=Pb	15.2	100	100	96.87	Pb>Cd=Ni
5.3	100	100	100	Cd=Ni=Pb	15.3	100	100	96.79	Pb>Cd=Ni
5.4	100	100	99.82	Pb>Cd=Ni	15.4	100	100	96.40	Pb>Cd=Ni
6.1	100	100	99.59	Pb>Cd=Ni	16.1	100	100	99.94	Pb>Cd=Ni
6.2	100	100	99.49	Pb>Cd=Ni	16.2	100	100	99.89	Pb>Cd=Ni
6.3	100	100	99.36	Pb>Cd=Ni	16.3	100	100	99.85	Pb>Cd=Ni
6.4	100	100	99.32	Pb>Cd=Ni	16.4	100	100	99.86	Pb>Cd=Ni
7.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb	17.1	100	100	98.99	Pb>Cd=Ni
7.2	100	100	100	Cd=Ni=Pb	17.2	100	100	98.92	Pb>Cd=Ni
7.3	100	100	100	Cd=Ni=Pb	17.3	100	100	98.52	Pb>Cd=Ni
7.4	100	100	100	Cd=Ni=Pb	17.4	99.61	100	98.61	Pb>Cd>Ni

Continua

CAMBISSOLO

8.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb	18.1	100	100	99.34	Pb>Cd=Ni
8.2	100	100	99.11	Pb>Cd=Ni	18.2	100	100	99.09	Pb>Cd=Ni
8.3	100	100	98.80	Pb>Cd=Ni	18.3	100	100	99.02	Pb>Cd=Ni
8.4	100	100	99.78	Pb>Cd=Ni	18.4	100	100	99.01	Pb>Cd=Ni
9.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb	19.1	100	100	100	Cd=Ni=Pb
9.2	100	100	99.74	Pb>Cd=Ni	19.2	100	100	99.86	Pb>Cd=Ni
9.3	100	100	99.63	Pb>Cd=Ni	19.3	100	100	99.77	Pb>Cd=Ni
9.4	100	100	99.52	Pb>Cd=Ni	19.4	100	100	99.58	Pb>Cd=Ni

NEOSSOLO

10.1	100	100	99.69	Pb>Cd=Ni
10.2	100	100	99.68	Pb>Cd=Ni
10.3	100	100	99.43	Pb>Cd=Ni
10.4	100	100	99.15	Pb>Cd=Ni

¹ Dose 1 - Adição de 0x da CMA; Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA; ² Porcentagem de Cr que permaneceu adsorvido após aplicação de doses crescentes de Cd, Ni e Pb.

3.3 Solos incubados com Ni

Na maior parte dos solos estudados, o metal pesado Pb foi aquele que se manteve mais adsorvido em comparação ao Cd e ao Cr. Em solos incubados com Ni houve uma menor adsorção de Cd em comparação com o Cr e Pb. Este comportamento indica uma dificuldade do Cd em ficar adsorvido em solos que já estão com os sítios ocupados por Ni. Sendo o Cd adsorvido especificamente, porém com força menor do que o Cr e Pb era de se esperar este comportamento uma vez que alguns autores apontam o Ni como mais fortemente adsorvido em relação ao Cd. O Pb foi o metal pesado que mais desorveu Ni do complexo de troca.



Figura 5. Adsorção de Cd, Cr e Pb em solos previamente incubados com doses equivalentes a Capacidade Máxima de Adsorção de Ni.



Figura 6. Dessorção do Ni previamente incubado em decorrência da aplicação de doses crescentes Cd, Cr e Pb.

As correlações observadas entre a quantidade de metal adsorvida em solos incubados com Ni e as características físico-químicas destes solos (Quadro 10), indicam que houve grande semelhança entre os comportamentos adsorptivos dos solos incubados com Ni e que receberam doses crescentes e individuais de Cd, Cr e Pb.

Quadro 10. Matriz de correlação de Pearson com valores significativos ($p < 0,01$) de Cd, Cr e Pb adsorvido em solos incubados com CMA de Ni e atributos do solo.

ATRIBUTOS	CD NICD	CR NICR	PB NIPB
pH H₂O	0,51	0,37	0,46
pH KCl	0,56	0,47	0,55
K	0,62	0,55	0,61
Ca	0,64	0,61	0,66
Mg	0,67	0,57	0,63
SB	0,65	0,61	0,67
CTC_{efetiva}	0,65	0,63	0,67
CTC_{total}	0,58	0,70	0,68
V	0,39	0,34	0,43
MO	0,38	0,59	0,49

Em solos incubados com a Capacidade Máxima de Adsorção de níquel (Quadro 11), para os mesmos horizontes, a seqüência de adsorção mais observada nos argissolos, latossolos, cambissolos e neossolo estudados foi chumbo, cromo e cádmio (Pb>Cr>Cd).

Quadro 11. Porcentagens de Cd, Cr e Pb adsorvidos em solo previamente incubado com a CMA de Ni.

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Cd	% Cr	% Pb	Sequência de afinidade	SOLO/ DOSE¹	% Cd	% Cr	% Pb	Sequência de afinidade
1.2	56	89	98	Pb>Cr>Cd	11.2	0	91	91	Pb>Cr>Cd
1.3	92	75	92	Pb>Cd>Cr	11.3	0	81	90	Pb>Cr>Cd
1.4	94	67	74	Cd>Pb>Cr	11.4	19	78	75	Cr>Pb>Cd
2.2	25	28	94	Pb>Cr>Cd	12.2	0	5	86	Pb>Cr>Cd
2.3	56	65	84	Pb>Cr>Cd	12.3	0	4	79	Pb>Cr>Cd
2.4	18	67	81	Pb>Cr>Cd	12.4	0	0	71	Pb>Cr=Cd
3.2	0	56	89	Pb>Cr>Cd	13.2	0	15	85	Pb>Cr>Cd
3.3	31	74	82	Pb>Cr>Cd	13.3	0	92	80	Cr>Pb>Cd
3.4	0	59	71	Pb>Cr>Cd	13.4	0	76	82	Pb>Cr>Cd
LATOSSOLO									
4.2	0	34	90	Pb>Cr>Cd	14.2	0	100	84	Cr>Pb>Cd
4.3	0	80	83	Pb>Cr>Cd	14.3	0	97	72	Cr>Pb>Cd
4.4	0	63	82	Pb>Cr>Cd	14.4	0	49	79	Pb>Cr>Cd
5.2	43	62	99	Pb>Cr>Cd	15.2	0	62	97	Pb>Cr>Cd
5.3	0	68	87	Pb>Cr>Cd	15.3	0	62	83	Pb>Cr>Cd
5.4	63	63	81	Pb>Cd>Cr	15.4	23	50	81	Pb>Cr>Cd
6.2	0	84	82	Cr>Pb>Cd	16.2	0	40	90	Pb>Cr>Cd
6.3	0	74	78	Pb>Cr>Cd	16.3	0	89	81	Cr>Pb>Cd
6.4	0	63	71	Pb>Cr>Cd	16.4	0	89	81	Cr>Pb>Cd
7.2	0	70	90	Pb>Cr>Cd	17.2	0	50	66	Pb>Cr>Cd
7.3	0	51	87	Pb>Cr>Cd	17.3	0	36	71	Pb>Cr>Cd
7.4	0	47	80	Pb>Cr>Cd	17.4	0	49	68	Pb>Cr>Cd
CAMBISSOLO									
8.2	67	41	68	Pb>Cd>Cr	18.2	0	57	79	Pb>Cr>Cd
8.3	0	54	72	Pb>Cr>Cd	18.3	0	94	70	Cr>Pb>Cd
8.4	0	48	79	Pb>Cr>Cd	18.4	0	60	68	Pb>Cr>Cd
9.2	32	81	97	Pb>Cr>Cd	19.2	22	80	96	Pb>Cr>Cd
9.3	0	82	89	Pb>Cr>Cd	19.3	79	88	93	Pb>Cr>Cd
9.4	63	77	84	Pb>Cr>Cd	19.4	76	82	89	Pb>Cr>Cd
NESOSSOLO									
10.2	0	0	100	Pb>Cr>Cd					
10.3	0	10	64	Pb>Cr>Cd					
10.4	0	46	69	Pb>Cr>Cd					

¹ Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA

Quadro 12. Porcentagens de Ni que permanece adsorvido por ocasião da aplicação de diferentes concentrações de Cd, Cr e Pb em solo previamente incubado com a CMA de Ni.

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Ni (Cd)²	% Ni (Cr)²	% Ni (Pb)²	Sequência de força de dessorção	SOLO/ DOSE¹	% Ni (Cd)²	% Ni (Cr)²	% Ni (Pb)²	Sequência de força de dessorção
1.1	83.1	90.9	89.2	Cd>Pb>Cr	11.1	65.2	51.5	62.0	Cr>Pb>Cd
1.2	70.1	67.3	68.4	Cr>Pb>Cd	11.2	51.9	50.7	44.3	Pb>Cr>Cd
1.3	62.6	51.8	47.3	Pb>Cr>Cd	11.3	43.5	57.7	74.9	Cd>Cr>Pb
1.4	55.9	52.0	34.8	Pb>Cr>Cd	11.4	32.1	78.7	28.4	Pb>Cd>Cr
2.1	69.4	74.7	70.7	Cd>Pb>Cr	12.1	41.6	49.5	32.6	Pb>Cd>Cr
2.2	61.4	61.8	53.6	Pb>Cd>Cr	12.2	38.2	51.9	20.0	Pb>Cd>Cr
2.3	54.5	43.6	42.9	Pb>Cr>Cd	12.3	25.9	45.1	21.9	Pb>Cd>Cr
2.4	40.8	60.9	34.9	Pb>Cd>Cr	12.4	28.5	42.4	7.4	Pb>Cd>Cr
3.1	73.7	73.3	69.8	Pb>Cr>Cd	13.1	53.1	52.6	56.2	Cr>Cd>Pb
3.2	59.7	55.4	55.0	Pb>Cr>Cd	13.2	38.4	53.6	41.3	Cd>Pb>Cr
3.3	45.0	55.4	40.3	Pb>Cd>Cr	13.3	31.9	53.7	27.7	Pb>Cd>Cr
3.4	44.5	66.8	53.3	Cd>Pb>Cr	13.4	23.7	90.8	28.6	Cd>Pb>Cr
LATOSSOLO									
4.1	61.2	48.1	56.3	Cr>Pb>Cd	14.1	52.6	44.2	40.2	Pb>Cr>Cd
4.2	51.2	46.6	44.6	Pb>Cr>Cd	14.2	50.1	48.3	29.4	Pb>Cr>Cd
4.3	46.9	55.0	36.7	Pb>Cd>Cr	14.3	24.7	42.9	#####	Cd>Cr>Pb
4.4	44.6	78.7	37.3	Pb>Cd>Cr	14.4	31.6	#####	18.2	Pb>Cd>Cr
5.1	78.1	68.2	76.9	Cr>Pb>Cd	15.1	49.6	47.8	58.7	Cr>Cd>Pb
5.2	65.9	61.6	62.2	Cr>Pb>Cd	15.2	30.7	47.1	44.6	Cd>Pb>Cr
5.3	57.0	62.1	48.2	Pb>Cd>Cr	15.3	21.2	32.1	37.7	Cd>Cr>Pb
5.4	53.3	24.6	38.7	Cr>Pb>Cd	15.4	7.2	84.5	26.6	Cd>Pb>Cr
6.1	51.7	51.9	59.7	Cd>Cr>Pb	16.1	36.0	43.3	51.3	Cd>Cr>Pb
6.2	43.2	50.1	44.7	Cd>Pb>Cr	16.2	41.2	52.8	27.0	Pb>Cd>Cr
6.3	41.8	47.1	36.8	Pb>Cd>Cr	16.3	30.2	43.9	29.3	Pb>Cr>Cd
6.4	44.6	89.7	39.4	Pb>Cd>Cr	16.4	26.2	63.2	21.0	Pb>Cd>Cr
7.1	65.4	53.3	91.8	Cr>Cd>Pb	17.1	41.2	39.0	31.5	Pb>Cr>Cd
7.2	59.6	49.4	56.2	Cr>Pb>Cd	17.2	38.3	44.8	14.7	Pb>Cd>Cr
7.3	54.1	48.8	38.2	Pb>Cr>Cd	17.3	28.4	50.0	14.0	Pb>Cd>Cr
7.4	41.6	79.8	38.2	Pb>Cd>Cr	17.4	30.3	16.7	0.3	Pb>Cr>Cd

Continua

CAMBISSOLO									
8.1	51.3	33.7	52.3	Cr>Cd>Pb	18.1	17.3	39.5	38.6	Cd>Pb>Cr
8.2	37.8	35.7	36.6	Cr>Pb>Cd	18.2	18.5	28.6	68.8	Cd>Cr>Pb
8.3	44.4	45.0	30.5	Pb>Cd>Cr	18.3	10.9	27.5	28.8	Cd>Cr>Pb
8.4	35.7	#####	#####	Cd>Cr=Pb	18.4	14.7	18.7	23.0	Cd>Cr>Pb
9.1	74.4	53.1	74.2	Cr>Pb>Cd	19.1	65.1	58.4	73.4	Cr>Cd>Pb
9.2	62.0	56.5	55.1	Pb>Cr>Cd	19.2	54.9	47.5	59.1	Cr>Cd>Pb
9.3	56.9	46.8	43.3	Pb>Cr>Cd	19.3	34.4	51.8	47.8	Cd>Pb>Cr
9.4	52.1	94.0	33.8	Pb>Cd>Cr	19.4	36.7	51.7	35.3	Pb>Cd>Cr
NEOSSOLO									
10.1	45.2	47.9	38.1	Pb>Cd>Cr					
10.2	51.0	49.8	30.8	Pb>Cr>Cd					
10.3	37.8	67.5	31.4	Pb>Cd>Cr					
10.4	28.0	99.9	7.5	Pb>Cd>Cr					

¹ Dose 1 - Adição de 0x da CMA; Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA; ² Porcentagem de Ni que permaneceu adsorvido após aplicação de doses crescentes de Cd, Cr e Pb

3.4 Solos incubados com Pb

De uma maneira geral, em solos incubados com a capacidade máxima de adsorção de Pb, houve predominância de maiores valores adsorvidos de Cr, Ni e Cd, respectivamente. No caso do solo 1 (Figura 7) não foi observada adsorção do cádmio nas adições posteriores de doses correspondentes a 1 vez e 1,5 vezes a CMA do cádmio, o que pode indicar que ele tem um mesmo mecanismo de adsorção do Pb, porém com menor força, por este motivo o Cd é um dos metais mais preocupantes ao ambiente. Este elemento possui alta mobilidade no solo. O níquel ficou adsorvido nas três doses aplicadas, este comportamento indica que o Ni é adsorvido por um mecanismo diferente do Pb. Já o cromo, para o qual também foi observada adsorção acentuada é adsorvido pelo mesmo mecanismo do Pb. De uma maneira geral o Cr foi o responsável pelos maiores valores de Pb dessorvido.

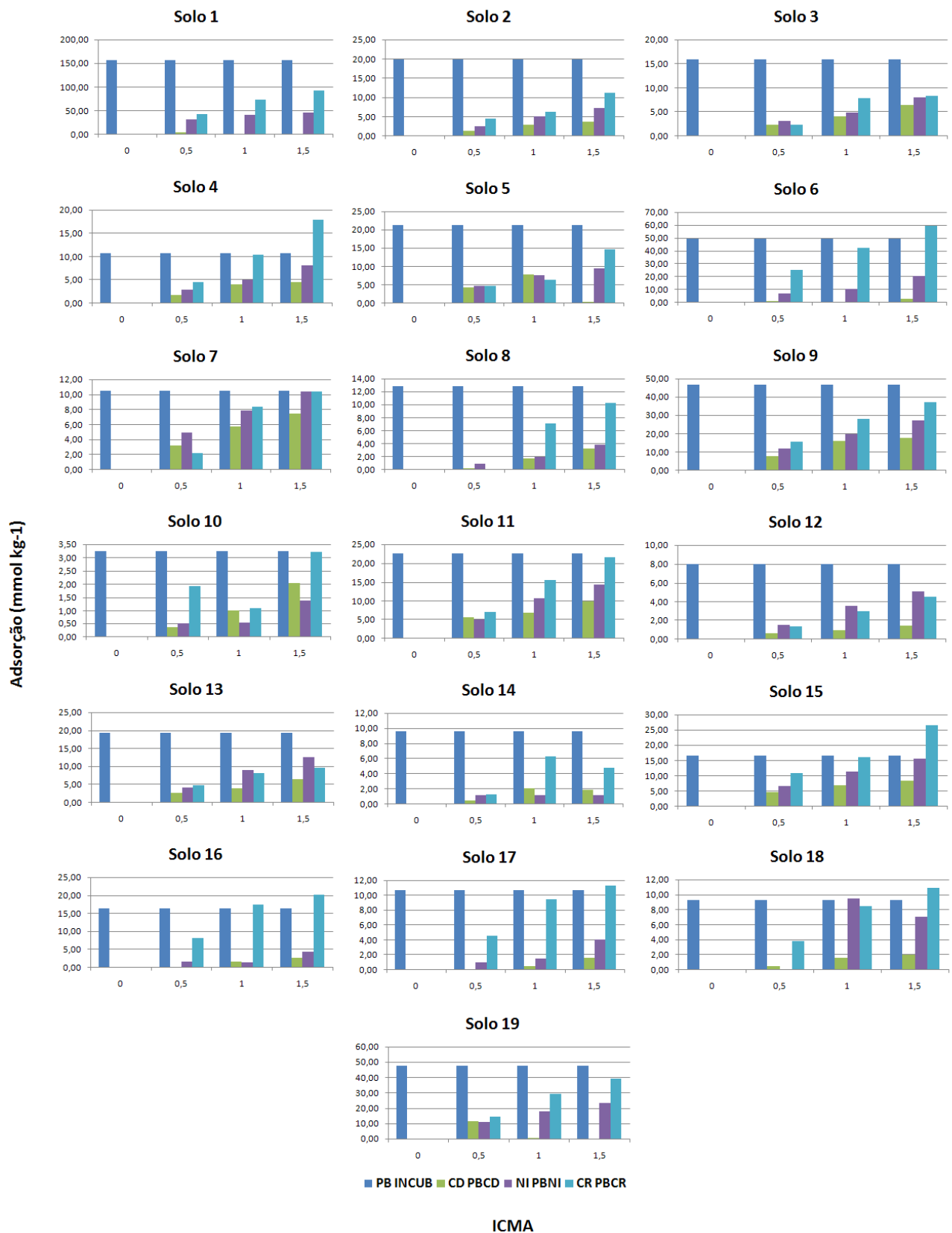


Figura 7. Adsorção de Cd, Ni e Cr em solos previamente incubados com doses equivalentes a Capacidade Máxima de Adsorção de Pb.

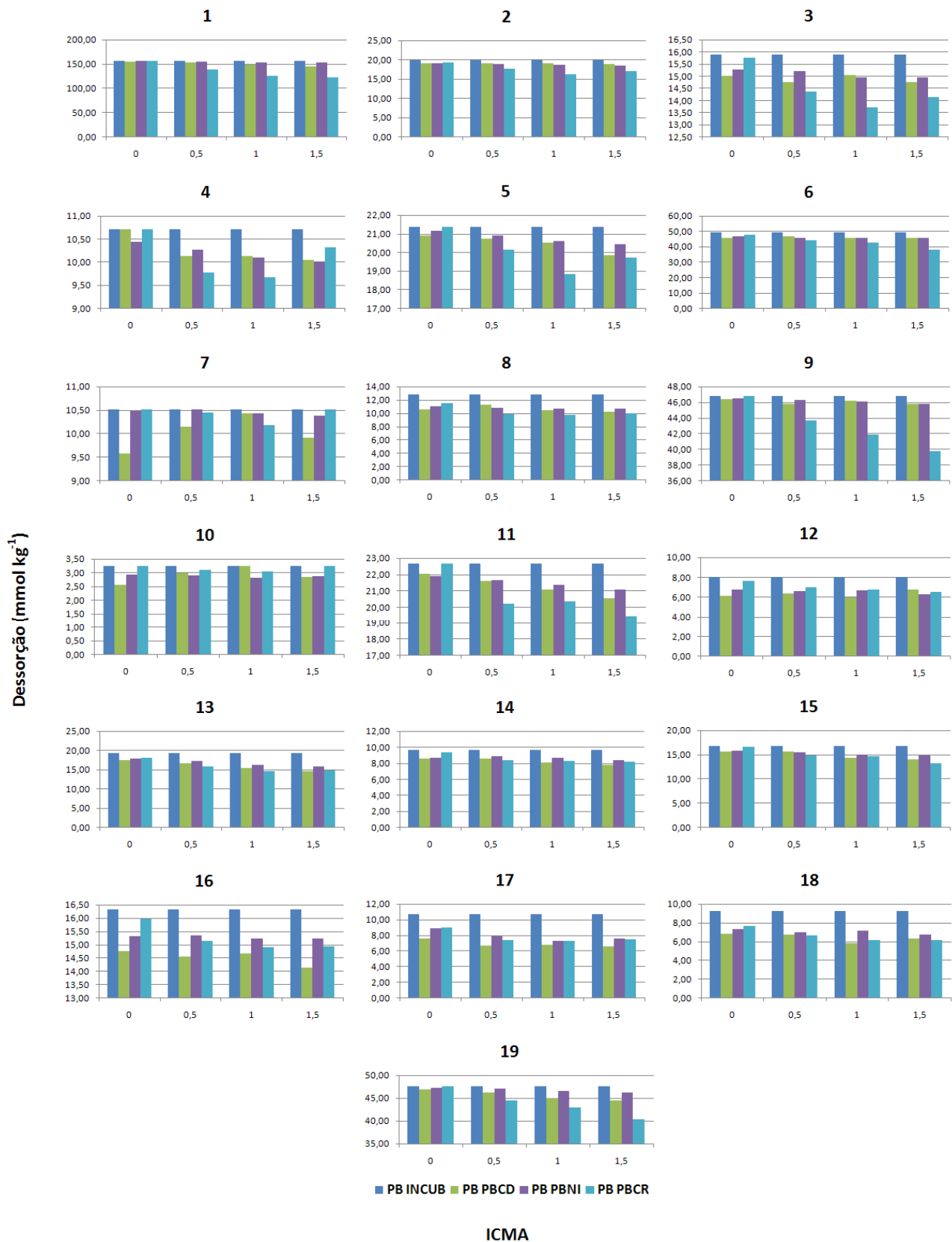


Figura 8. Dessorção do Pb previamente incubado em decorrência da aplicação de doses crescentes Cd, Ni e Cr.

As correlações observadas entre a quantidade de metal adsorvida em solos incubados com Pb e as características físico-químicas destes solos (Quadro 13), indicam de maneira geral que houve uma maior semelhança entre os comportamentos adsortivos dos solos incubados com Pb e que receberam doses crescentes e individuais de Ni e Cr em comparação aos solos que receberam doses crescente de Cd nas mesmas condições. A adsorção de Cd correlacionou-se positivamente apenas com a saturação de bases (V) e negativamente com a saturação por alumínio. A adsorção do Cd é específica e altos teores de bases trocáveis, que competem com os metais pesados por sítios de adsorção, pode estar determinando este comportamento.

Quadro 13. Matriz de correlação de Pearson com valores significativos ($p < 0,01$) de Cd, Ni e Cr adsorvido em solos incubados com CMA de Pb e atributos do solo.

ATRIBUTOS	CD PBCD	NI PBNI	CR PBCR
pH H₂O	-	0,52	0,35
pH KCl	-	0,56	0,44
K	-	0,62	0,52
Ca	-	0,69	0,58
Mg	-	0,67	0,54
SB	-	0,70	0,59
CTC_{efetiva}	-	0,69	0,60
CTC_{total}	-	0,67	0,68
V	0,38	0,52	0,32
MO	-	0,41	0,58

Em solos incubados com a Capacidade Máxima de Adsorção de chumbo, para os mesmos horizontes, o cromo foi o metal mais adsorvido. Para os Argissolos estudados o segundo metal mais adsorvido foi o níquel seguido do cádmio, já para os Latossolos, Cambissolo e Neossolo o cádmio foi o segundo mais adsorvido seguido do níquel.

Quadro 14. Porcentagens de Cd, Ni e Cr adsorvidos em solo previamente incubado com a CMA de Pb.

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Cd	% Ni	% Cr	Sequência de afinidade	SOLO/ DOSE¹	% Cd	% Ni	% Cr	Sequência de afinidade
1.2	5	51	81	Cr>Ni>Cd	11.2	67	39	83	Cr>Cd>Ni
1.3	0	35	64	Cr>Ni>Cd	11.3	40	42	87	Cr>Ni>Cd
1.4	0	26	55	Cr>Ni>Cd	11.4	39	37	80	Cr>Cd>Ni
2.2	32	35	74	Cr>Cd>Ni	12.2	27	27	78	Cr>Cd>Ni
2.3	34	34	54	Cr>Ni>Cd	12.3	20	31	75	Cr>Ni>Cd
2.4	28	33	61	Cr>Ni>Cd	12.4	20	28	72	Cr>Ni>Cd
3.2	57	42	53	Cd>Cr>Ni	13.2	46	37	100	Cr>Cd>Ni
3.3	50	32	81	Cr>Cd>Ni	13.3	32	38	82	Cr>Ni>Cd
3.4	51	36	55	Cr>Cd>Ni	13.4	35	35	67	Cr>Ni>Cd
LATOSSOLO									
4.2	50	38	59	Cr>Cd>Ni	14.2	23	35	43	Cr>Ni>Cd
4.3	58	33	63	Cr>Cd>Ni	14.3	45	17	100	Cr>Cd>Ni
4.4	43	35	78	Cr>Cd>Ni	14.4	26	13	50	Cr>Cd>Ni
5.2	43	47	100	Cr>Ni>Cd	15.2	57	47	74	Cr>Cd>Ni
5.3	38	37	64	Cr>Cd>Ni	15.3	42	40	56	Cr>Cd>Ni
5.4	1	31	96	Cr>Ni>Cd	15.4	35	37	60	Cr>Ni>Cd
6.2	28	33	79	Cr>Ni>Cd	16.2	12	30	100	Cr>Ni>Cd
6.3	10	25	65	Cr>Ni>Cd	16.3	28	16	100	Cr>Cd>Ni
6.4	23	32	61	Cr>Ni>Cd	16.4	32	27	79	Cr>Cd>Ni
7.2	63	63	41	Ni>Cd>Cr	17.2	0	22	100	Cr>Ni>Cd
7.3	56	51	76	Cr>Cd>Ni	17.3	17	17	100	Cr>Cd>Ni
7.4	48	45	63	Cr>Cd>Ni	17.4	36	27	80	Cr>Cd>Ni
CAMBISSOLO									
8.2	*	*	*	*	18.2	22	0	100	Cr>Cd>Ni
8.3	37	25	79	Cr>Cd>Ni	18.3	29	61	100	Cr>Ni>Cd
8.4	45	32	74	Cr>Cd>Ni	18.4	26	31	87	Cr>Ni>Cd
9.2	74	54	82	Cr>Cd>Ni	19.2	65	44	87	Cr>Cd>Ni
9.3	76	47	71	Cd>Cr>Ni	19.3	1	35	87	Cr>Ni>Cd
9.4	54	41	65	Cr>Cd>Ni	19.4	0	30	78	Cr>Ni>Cd
NEOSSOLO									
10.2	28	20	100	Cr>Cd>Ni					
10.3	37	10	29	Cd>Cr>Ni					
10.4	48	18	52	Cr>Cd>Ni					

¹ Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA; *Sem condições de determinar.

Quadro 15. Porcentagens de Pb que permanece adsorvido por ocasião da aplicação de diferentes concentrações de Cd, Ni e Cr em solo previamente incubado com a CMA de Pb.

ARGISSOLO									
Horizonte A					Horizonte B				
SOLO/ DOSE¹	% Pb (Cd)²	% Pb (Ni)²	% Pb (Cr)²	Sequência de força de dessorção	SOLO/ DOSE¹	% Pb (Cd)²	% Pb (Ni)²	% Pb (Cr)²	Sequência de força de dessorção
1.1	99.2	99.6	99.8	Cd>Ni>Cr	11.1	97.3	96.7	100.0	Ni>Cd>Cr
1.2	97.5	98.8	88.8	Cr>Cd>Ni	11.2	95.4	95.6	89.1	Cr>Cd>Ni
1.3	95.3	98.2	80.5	Cr>Cd>Ni	11.3	93.1	94.3	89.9	Cr>Cd>Ni
1.4	92.8	97.8	78.2	Cr>Cd>Ni	11.4	90.6	93.1	85.8	Cr>Cd>Ni
2.1	96.3	96.6	97.7	Cd>Ni>Cr	12.1	77.0	84.2	96.0	Cd>Ni>Cr
2.2	96.4	95.5	89.1	Cr>Ni>Cd	12.2	80.2	82.9	87.3	Cd>Ni>Cr
2.3	95.9	94.3	81.6	Cr>Ni>Cd	12.3	75.3	83.9	84.9	Cd>Ni>Cr
2.4	95.0	93.3	86.0	Cr>Ni>Cd	12.4	84.2	79.2	81.4	Ni>Cr>Cd
3.1	94.6	96.1	99.3	Cd>Ni>Cr	13.1	90.8	93.0	93.7	Cd>Ni>Cr
3.2	93.0	95.8	90.5	Cr>Cd>Ni	13.2	86.7	89.3	82.7	Cr>Cd>Ni
3.3	94.7	94.1	86.4	Cr>Ni>Cd	13.3	80.0	84.9	76.2	Cr>Cd>Ni
3.4	92.9	94.2	89.1	Cr>Cd>Ni	13.4	76.5	82.4	77.6	Cd>Cr>Ni
LATOSSOLO									
4.1	100.0	97.5	100.0	Ni>Cd=Cr	14.1	88.9	90.0	97.3	Cd>Ni>Cr
4.2	94.6	95.9	91.2	Cr>Cd>Ni	14.2	88.9	92.5	87.3	Cr>Cd>Ni
4.3	94.6	94.3	90.4	Cr>Ni>Cd	14.3	84.6	90.3	86.3	Cd>Cr>Ni
4.4	93.9	93.5	96.3	Ni>Cd>Cr	14.4	81.0	87.2	85.5	Cd>Cr>Ni
5.1	98.0	99.1	100.0	Cd>Ni>Cr	15.1	93.8	95.0	99.2	Cd>Ni>Cr
5.2	97.0	97.9	94.4	Cr>Cd>Ni	15.2	94.0	93.2	88.5	Cr>Ni>Cd
5.3	96.0	96.6	88.3	Cr>Cd>Ni	15.3	85.8	90.2	88.0	Cd>Cr>Ni
5.4	93.0	95.8	92.4	Cr>Cd>Ni	15.4	83.8	88.7	79.2	Cr>Cd>Ni
6.1	92.6	94.2	96.5	Cd>Ni>Cr	16.1	90.4	93.8	97.8	Cd>Ni>Cr
6.2	94.0	92.8	89.5	Cr>Ni>Cd	16.2	89.2	94.0	92.7	Cd>Cr>Ni
6.3	92.5	92.0	86.5	Cr>Ni>Cd	16.3	90.0	93.3	91.4	Cd>Cr>Ni
6.4	92.8	92.5	77.2	Cr>Ni>Cd	16.4	86.8	93.3	91.5	Cd>Cr>Ni
7.1	91.1	99.7	100.0	Cd>Ni>Cr	17.1	71.4	83.2	84.6	Cd>Ni>Cr
7.2	96.4	100.0	99.3	Cd>Cr>Ni	17.2	62.9	74.5	69.8	Cd>Cr>Ni
7.3	99.1	99.2	96.8	Cr>Cd>Ni	17.3	63.8	69.0	68.8	Cd>Cr>Ni
7.4	94.3	98.7	100.0	Cd>Ni>Cr	17.4	62.2	71.8	70.4	Cd>Cr>Ni

Continua

CAMBISSOLO

8.1	82.5	85.5	89.3	Cd>Ni>Cr	18.1	73.5	79.0	82.6	Cd>Ni>Cr
8.2	88.0	84.5	76.9	Cr>Ni>Cd	18.2	72.7	75.2	71.7	Cr>Cd>Ni
8.3	81.0	83.0	75.8	Cr>Cd>Ni	18.3	62.4	76.9	66.0	Cd>Cr>Ni
8.4	79.1	82.7	77.2	Cr>Cd>Ni	18.4	68.0	72.8	66.6	Cr>Cd>Ni
9.1	99.2	99.5	100.0	Cd>Ni>Cr	19.1	98.5	99.1	100.0	Cd>Ni>Cr
9.2	98.0	99.0	93.4	Cr>Cd>Ni	19.2	97.2	98.7	93.5	Cr>Cd>Ni
9.3	98.7	98.5	89.6	Cr>Ni>Cd	19.3	94.5	97.7	89.9	Cr>Cd>Ni
9.4	97.9	97.8	85.1	Cr>Ni>Cd	19.4	93.4	97.1	84.5	Cr>Cd>Ni

NEOSSOLO

10.1	79.1	90.7	100.0	Cd>Ni>Cr
10.2	91.9	89.8	95.4	Ni>Cd>Cr
10.3	100.0	87.2	93.6	Ni>Cr>Cd
10.4	87.8	88.8	100.0	Cd>Ni>Cr

1 Dose 1 - Adição de 0x da CMA; Dose 2 - Adição de 0,5x da CMA; Dose 3 - Adição de 1x da CMA; Dose 4 - Adição de 1,5x da CMA; 2 Porcentagem de Pb que permaneceu adsorvido após aplicação de doses crescentes de Cd, Ni e Cr.

3.5. Análises de Agrupamentos

A análise de agrupamentos hierárquica (Sneath & Sokal, 1973) foi realizada calculando-se a distância euclidiana entre as amostras, para o conjunto das 19 amostras de solos incubados com um metal e tratado posteriormente com doses individuais de três outros metais pesados, e utilizando a ligação simples para a obtenção dos agrupamentos dos solos com comportamento similar. O resultado da análise foi apresentado em forma gráfica (dendrograma) que auxiliou na identificação dos agrupamentos das amostras. De uma forma geral, a divisão e o agrupamento das amostras de solos mostraram um resultado muito importante que foi a ordenação dessas amostras segundo as quantidades adsorvidas do metal posteriormente adicionado. Os solos que inicialmente receberam quantidades semelhantes do segundo metal, se agruparam, demonstrando que se comportaram semelhantemente quando analisamos as quantidades deste metal adsorvido nas diferentes doses.

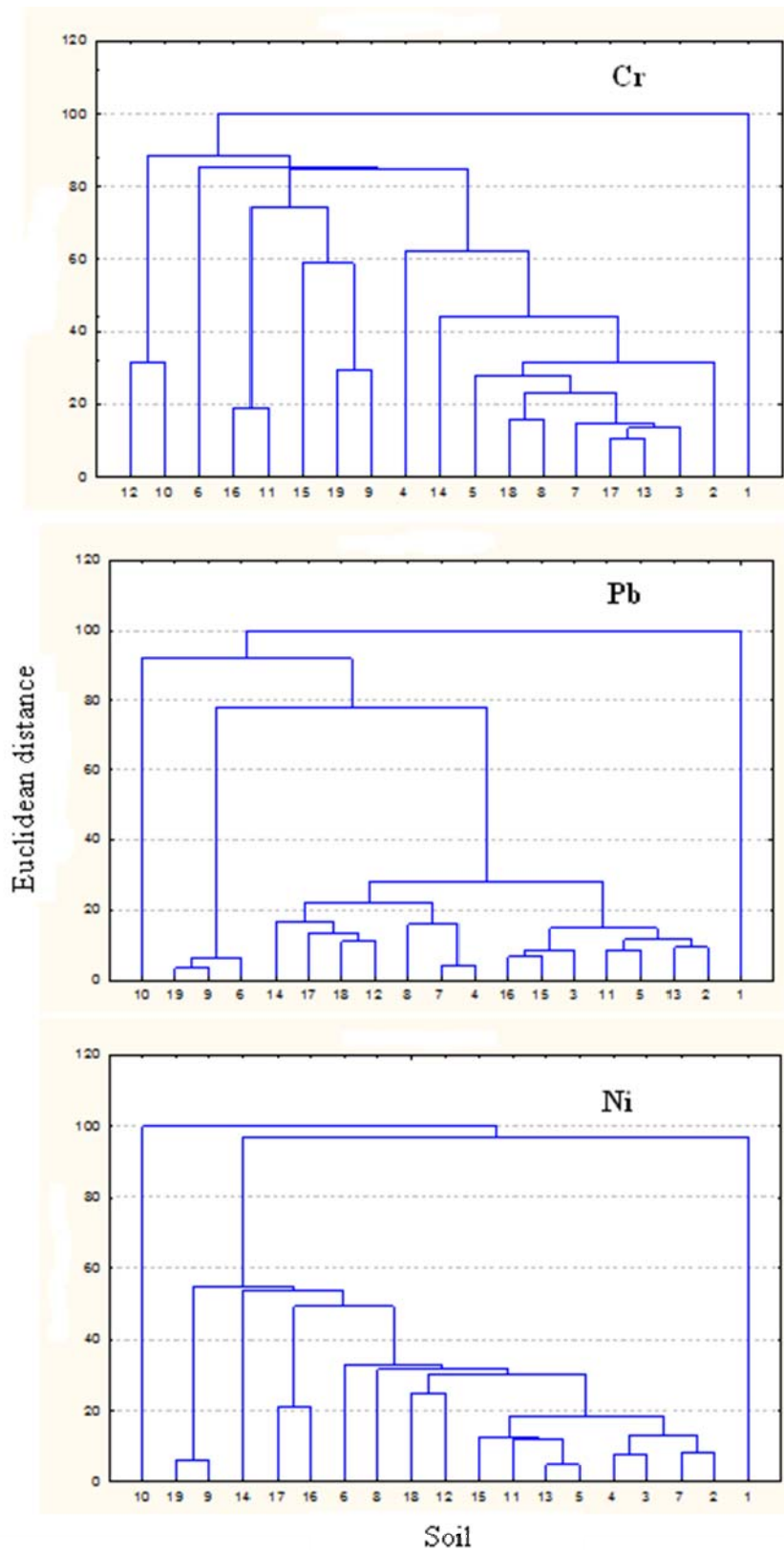


Figura 9. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico, mostrando a formação de grupos de acordo com a adsorção de Cr, Pb e Ni em solos incubados com CMA Cd. Um horizonte de PVA (1, 2 e 3) horizonte B (11, 12 e 13); horizonte LVA A (4 e 5) horizonte B (14 e 15); horizonte LV A (6 e 7) horizonte B (16 e 17); CX horizonte A (8 e 9) horizonte B (18 e 19); RQ horizonte A (10).

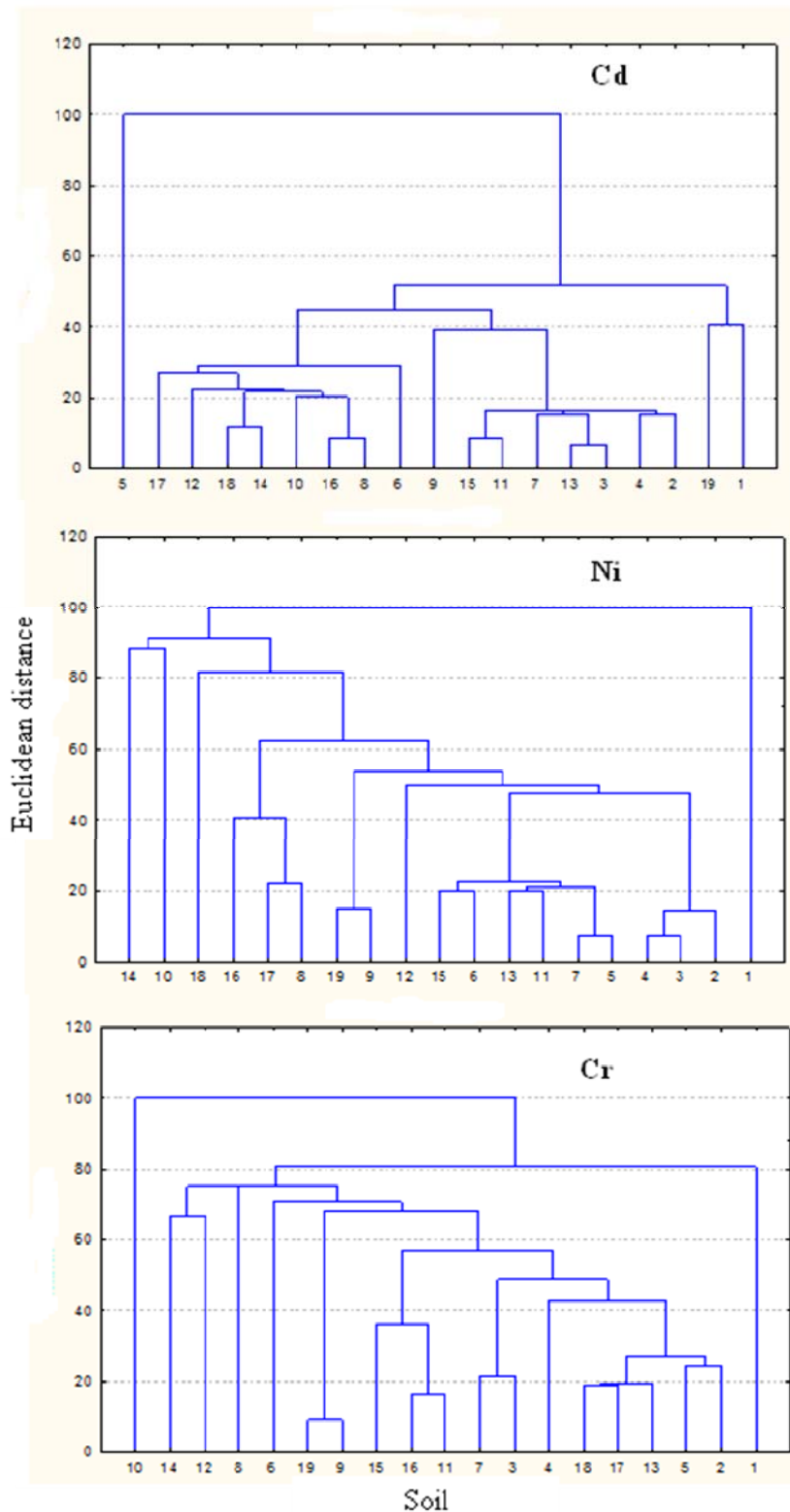


Figura 10. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico, mostrando a formação de grupos de acordo com a adsorção de Cd, Ni e Cr em solos incubados com CMA Pb. Um horizonte de PVA (1, 2 e 3) horizonte B (11, 12 e 13); horizonte LVA A (4 e 5) horizonte B (14 e 15); horizonte LV A (6 e 7) horizonte B (16 e 17); CX horizonte A (8 e 9) horizonte B (18 e 19); RQ horizonte A (10).

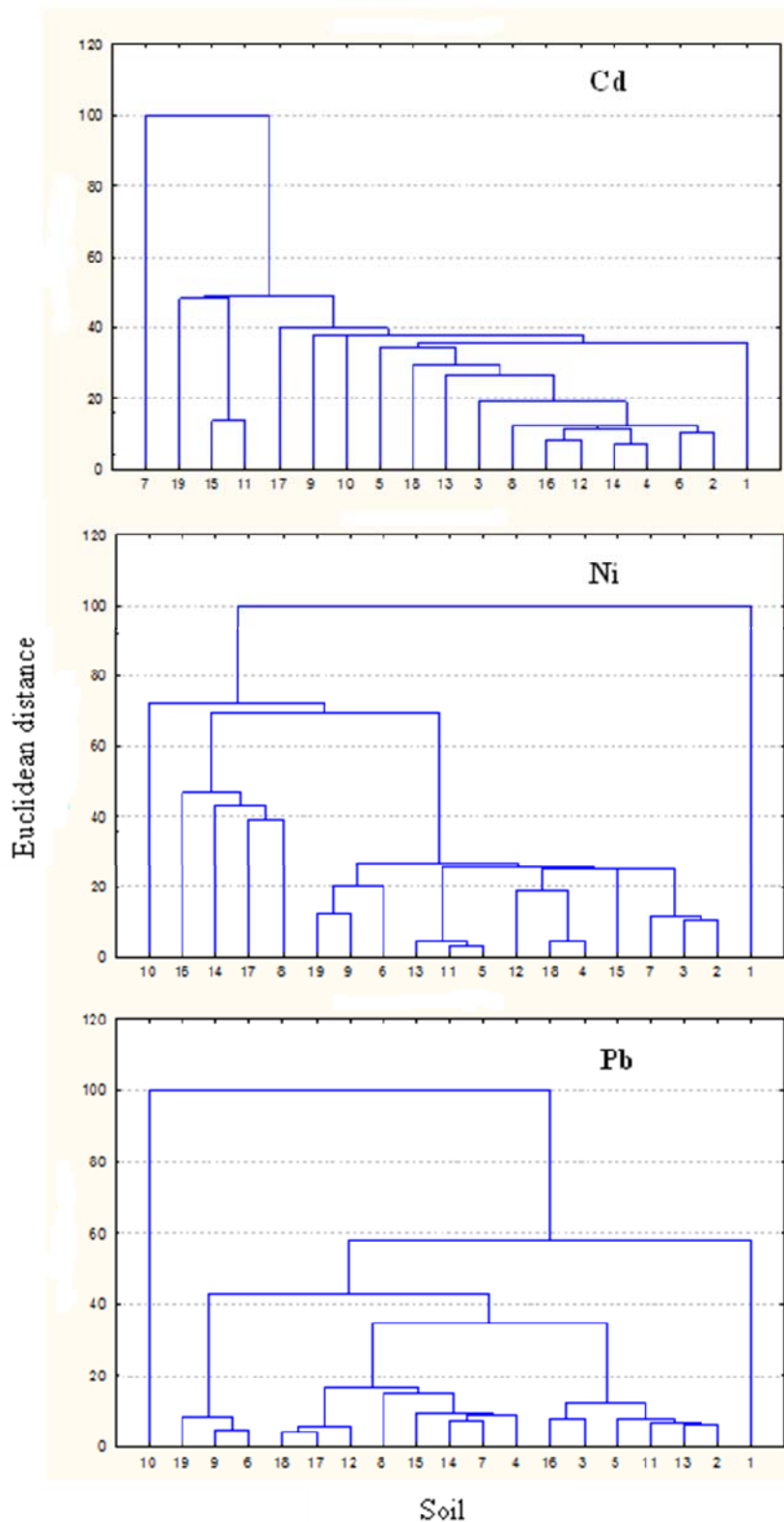


Figura 11. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico, mostrando a formação de grupos de acordo com a adsorção de Cd, Ni e Pb em solos incubados com CMA Cr. Um horizonte de PVA (1, 2 e 3) horizonte B (11, 12 e 13); horizonte LVA A (4 e 5) horizonte B (14 e 15); horizonte LV A (6 e 7) horizonte B (16 e 17); CX horizonte A (8 e 9) horizonte B (18 e 19); RQ horizonte A (10).

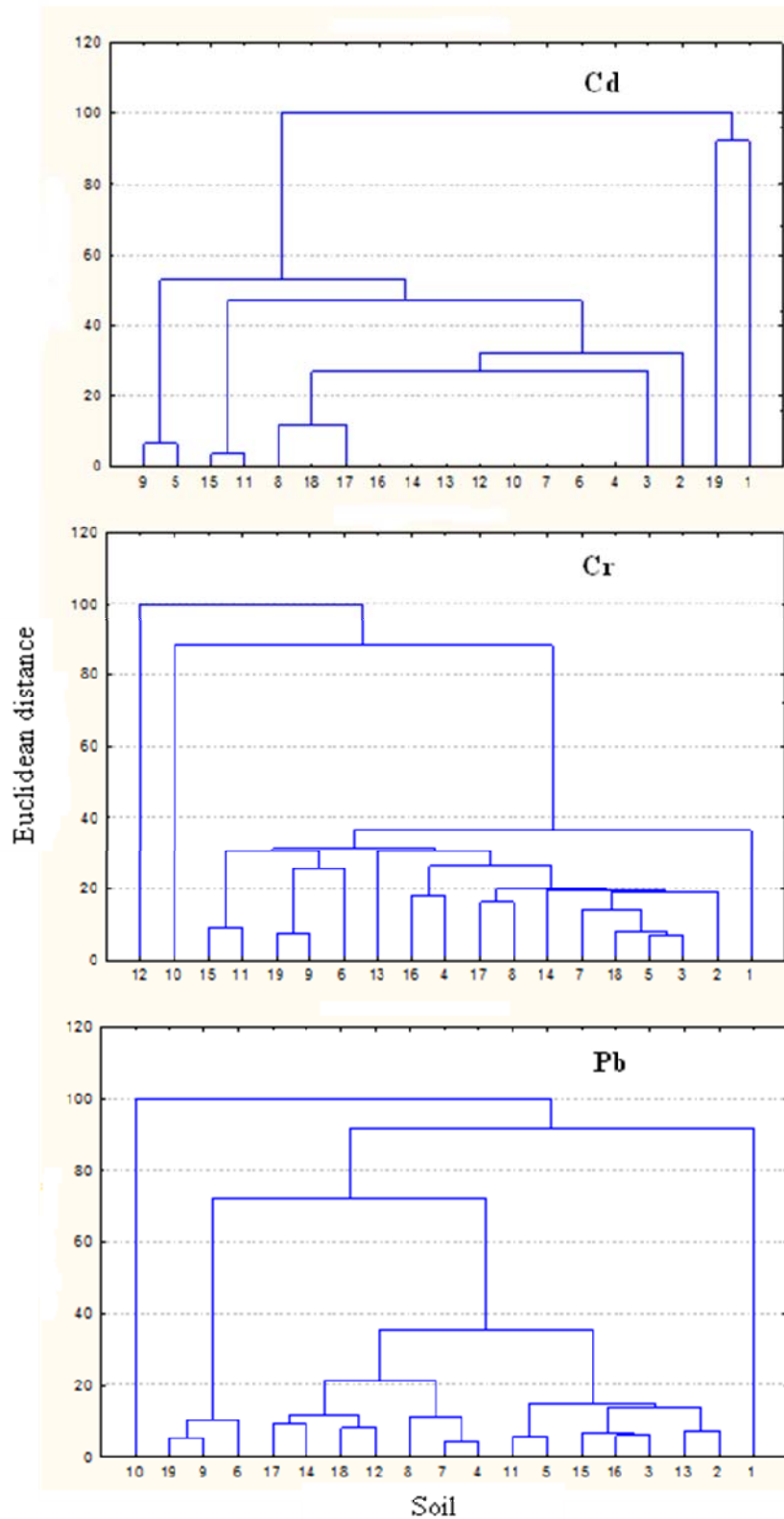


Figura 12. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico, mostrando a formação de grupos de acordo com a adsorção de Cd, Cr e Pb em solos incubados com CMA Ni. Um horizonte de PVA (1, 2 e 3) horizonte B (11, 12 e 13); horizonte LVA A (4 e 5) horizonte B (14 e 15); horizonte LV A (6 e 7) horizonte B (16 e 17); CX horizonte A (8 e 9) horizonte B (18 e 19); RQ horizonte A (10).

4. CONCLUSÕES

1. As características mais importantes para adsorver metais por estes ensaios, já tendo um metal adsorvido, foram matéria orgânica, CTC e conteúdo de argila dos solos;
2. Os metais pesados Cr e Pb foram os que desorveram maiores quantidades de metais previamente incubados nos solos estudados, sendo também os mais fortemente adsorvidos na mesma situação.

5. BIBLIOGRAFIA

ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils. London: Blackie A e P, 1995. 368p.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. 32p. (Boletim informativo, 25).

BASILIO, M. S., FRIESE, K., LENA, J. C., NALINI JR., H. A. & ROESER, H. M. P. Adsorção de As, Cu, Pb e Cr na avaliação da capacidade de fixação de metais por resíduo de mineradoras de ferro. *Quim. Nova*. 28: 822-828, 2005.

BARTLETT, R. & JAMES, B. R. Chromium. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M.A; JOHSTON, C.T & SUMNER, M.E. *Methods of soil analysis – chemical methods. Part 3.* Soil Science Society of America. 683-701, 1996.

De FILIPPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. *Análise química do solo - metodologia.* 2.ed. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26p.

FERREIRA, B. N. F. S.; XAVIER, B. T. L. & FRANÇA, M. M. Determinação da capacidade máxima de adsorção de metais pesados em solos de referência do Estado de Minas Gerais. Dados não publicados, 2009.

FONTES, M. P. F., MATOS, A. T., COSTA, L.M. & NEVES, J. C. L. Competitive adsorption of zinc, cadmium, copper and lead in three highly weathered Brazilian soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31:2939-2958, 2000.

FONTES, M. P. F. & GOMES, P. C. Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by the mineral matrix of tropical soils. *Applied Geochemistry.* 18:795-804, 2003.

GAO, S.A.. W.J. WALKER, R.A. DAHLGREN. & J. BOLD. Simultaneous sorption of Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, and Cr on soils treated with sewage sludge supernatant. *Water Air Soil Pollut.* 93:331-345, 1997.

GOMES, P.C., FONTES, M. P. F., COSTA, L.M. da & MENDONÇA, E.S. Extração fracionada de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo. 21:543-331, 1997.

GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; SILVA, A. G.; MENDONÇA, E. S. & NETTO, A. R. Selectivity Sequence and Competitive Adsorption of Heavy Metals by Brazilian Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:1115-1121, 2001.

HODGSON, J.F. Chemistry of the micronutrient elements in soils. Advances in Agronomy, New York, 15:119-59,1963.

HUHEEY, J.E.. Inorganic chemistry: Principles of structure and reactivity. 3rd ed. Harper and Row. San Francisco. CA, 1983.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. 3. ed. Boca Raton, CRC Press, 2001. 413p.

KAMALA-KANNAN, S., BATVARI, B. P. D., LEE, K. J., KANNAN, N., KRISHNAMOORTHY, R., SHANTHY, K. & JAYAPRAKASH, M. Assessment of heavy metals (Cd, Cr and Pb) in water, sediment and seaweed (*Ulva lactuca*) in the Pulicat Lake, South East India. Chemosphere. 71:1233–1240, 2008.

KRISHNAMURTI, G.S.R., HUANG, P.M. & KOZAK, L.M. Sorption and desorption of cadmium from soils: influence of phosphate. Soil Sci. 164:888–898, 1999.

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

MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; JORDÃO, C.P. & COSTA, L.M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 20:379-386, 1996.

MCBRIDE, M.B.. Environmental chemistry of soils. New York: Oxford Univ. Press, 1994, 406p.

MATTIGOD, S. V. & PAGE, A. L. Assessment of metal pollution in soils. In: THORNTON, I. (ed.). Applied environmental geochemistry. Academic Press, London, 1993, p.355-394.

McLEAN, J.E., BLEDSOE, B.E. Behaviour of metals in soils. EPA Ground Water Issue. 1992. Environmental Protection Agency, Washington. EPA 540-S-92-018:25pp.

MOREIRA, C. S. Adsorção competitiva de Cádmio, Cobre, Níquel e Zinco em solos. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2004. 108p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.

NASCIMENTO, C. W. A. & FONTES, R. L. F.. Correlação entre características de latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. R. Bras. Ci. Solo. 28:965-971, 2004.

PARDO, M.T. Sorption of lead, copper, zinc, and cadmium by soils: Effect of nitriloacetic acid on metal retention. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31:31-40, 2000.

PHILLIPS, I.R. Copper, lead, cadmium, and zinc sorption by waterlogged and air-dry soil. J. Soil Contam. 8:343-364, 1999.

PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; ANDERSON, S.J. & LIMA, J.M. Adsorção e dessorção de cádmio, cobre e chumbo por amostras de Latossolos pré-tratadas com fósforo. R. Bras. Ci. Solo. 28:377-384, 2004.

PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; COSTA, E.T.S.; LIMA, J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M. & FIGUEIREDO, L.F.P. Comportamento sortivo, individual e competitivo, de metais pesados em Latossolos com mineralogia contrastante. R. Bras. Ci. Solo. 31:819-826, 2007.

RIEUWERTS, J.S.; THORNTON, I.; FARAGO, M.E. & ASHMORE, M.R. Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chem. Speciat. Bioavailab.* 10:61–75, 1998.

SNEATH, P.H. & SOKAL, R.R. *Numerical taxonomy: The principles and practice of numerical classification.* San Francisco, W.H. Freeman, 1973. 573p.

SPARKS, D.L. *Environmental soil chemistry.* San Diego: Academic Press, 1995. 276p.

SPOSITO, G. 1994 *Chemical equilibria and kinetics in soils* Oxford Univ Press, New York.

STATSOFT, Inc. (2004). *STATISTICA* (data analysis software system), version 7.
Disponível em: <www.statsoft.com>.

STEVENSON, F. J. & COLE, M. A. Micronutrients and toxic metals. In: STEVENSON, F. J., COLE, M. A. *Cycles of soil.* 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. p. 371 – 414.

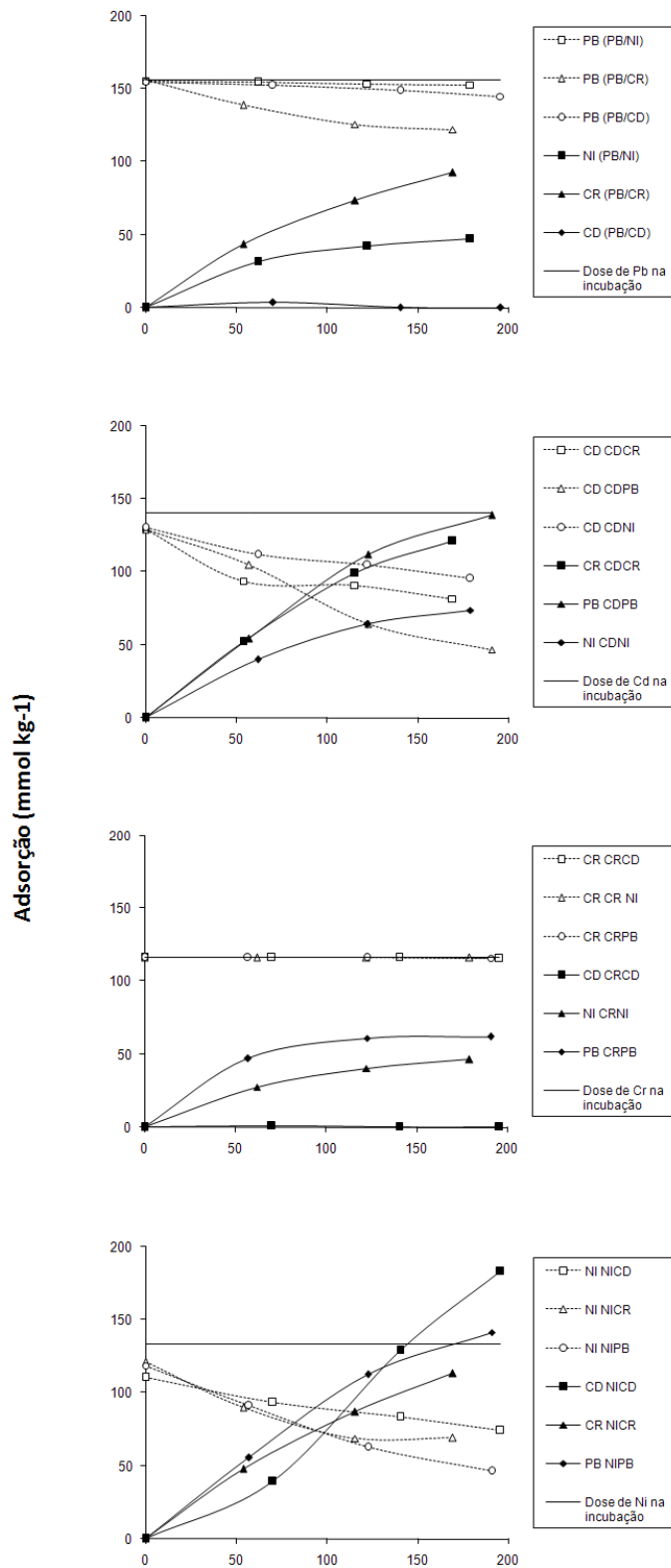
STUMM, W., B. WEHRLI, & E. WIELAND. 1987. Surface complexation and its impact on geochemical kinetics. *Croat. Chem. Acta* 50:429–456.

SUN, B.; ZHAO, F. J.; LOMBI, E. & McGRATH, S.P. Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA. *Environ. Pollut.*, 113:111-120, 2001.

SUZUKI, E. Y.; TAIOLI, F.; RODRIGUES, C. L. Avaliação do comportamento geoquímico do solo da região do lixão de Ilhabela – SP. *Águas Subterrâneas.* 19:67-76, 2005.

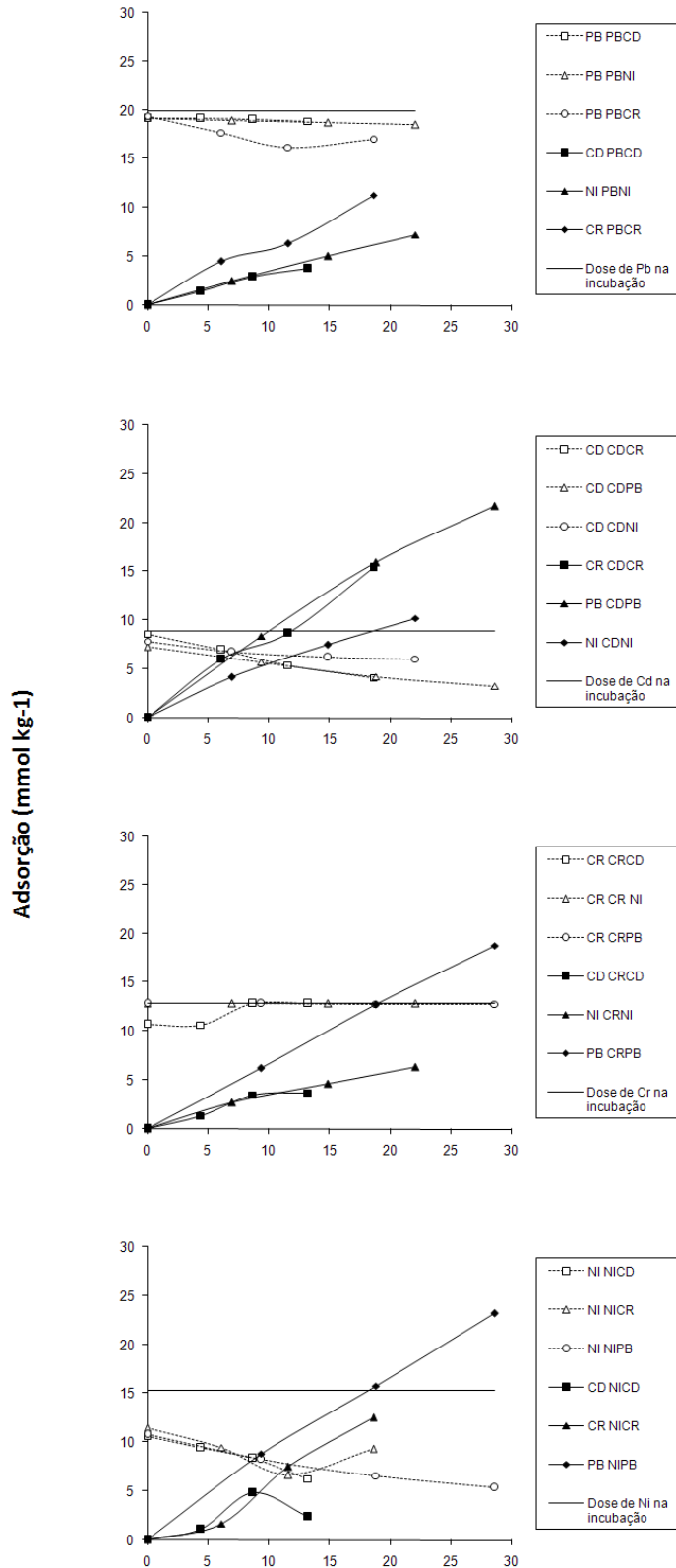
USMAN, A.R.A. The relative adsorption selectivities of Pb, Cu, Zn, Cd and Ni by soils developed on shale in New Valley, Egypt. *Geoderma.* 144:334–343, 2008.

ANEXO



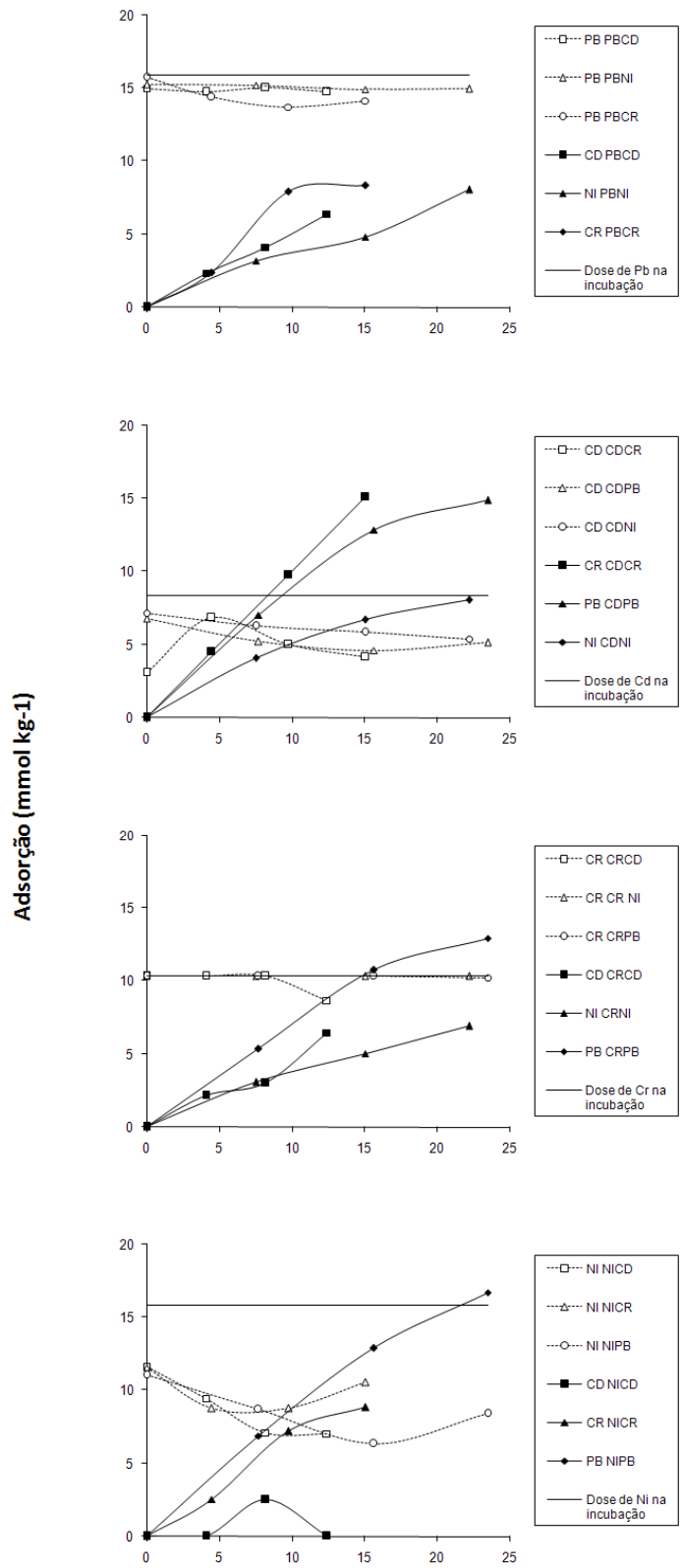
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 1 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



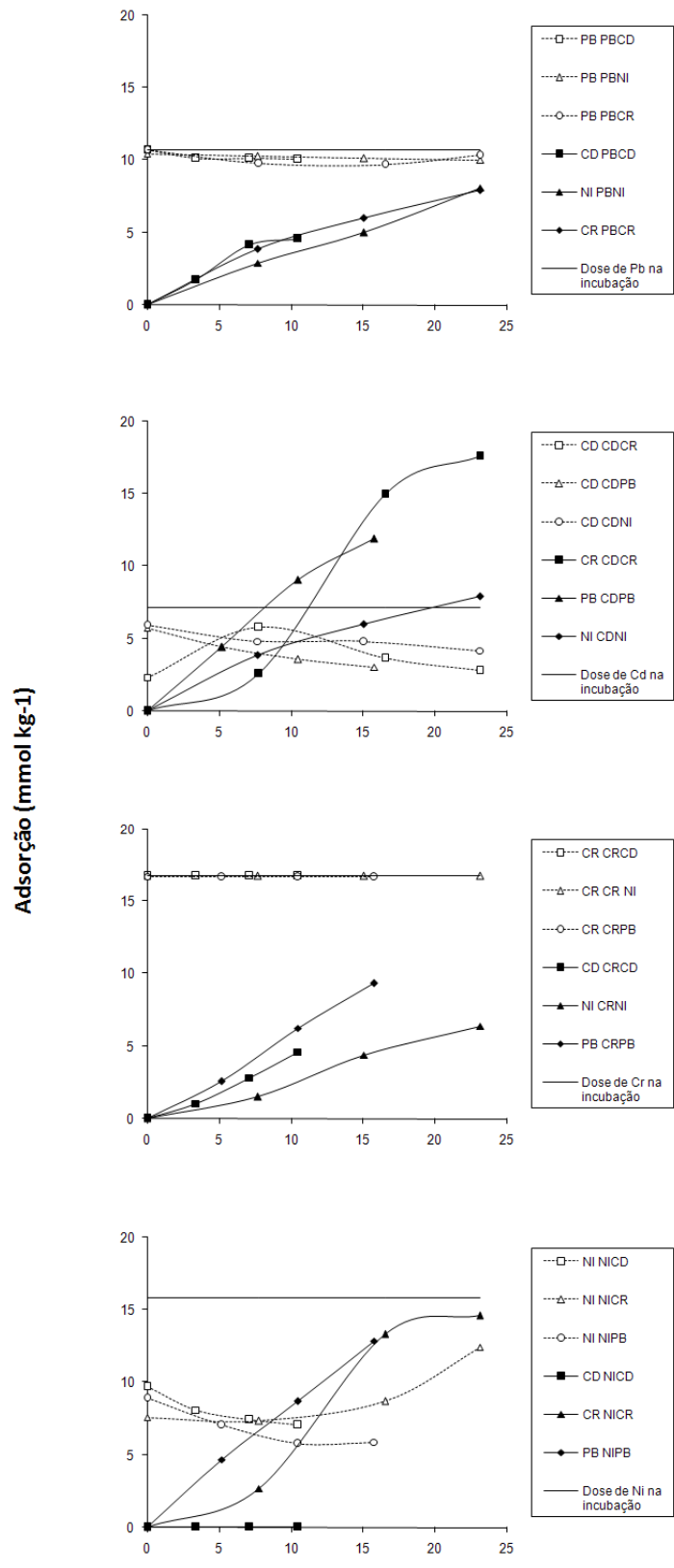
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 2 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



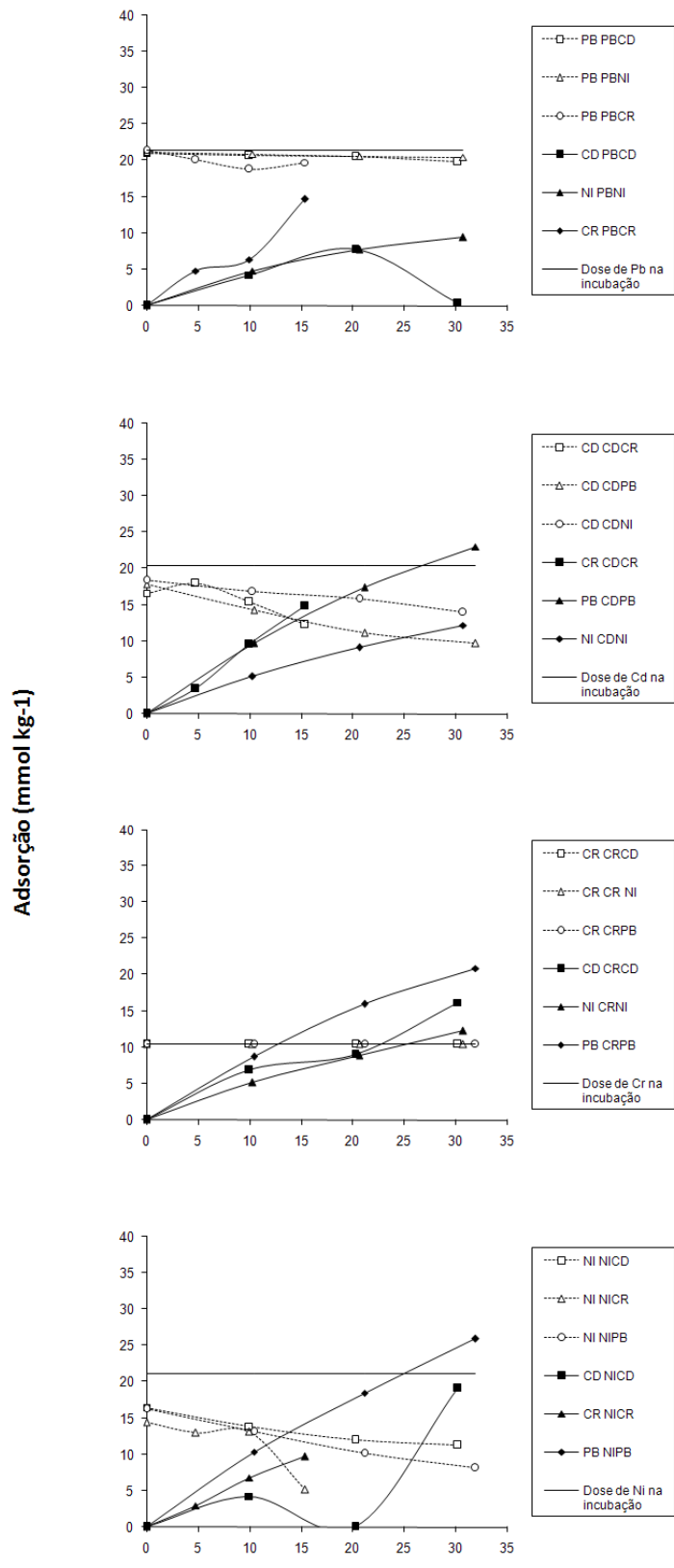
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 3 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



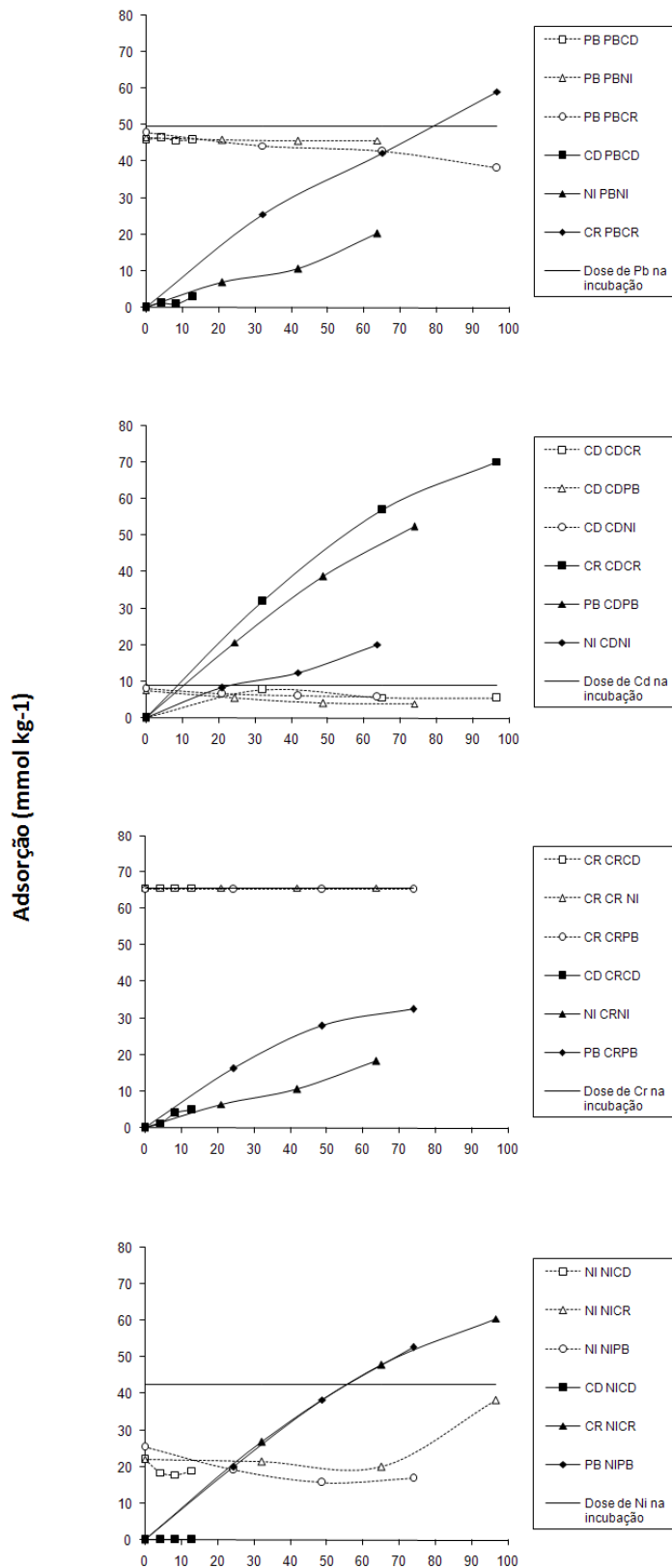
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 4 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



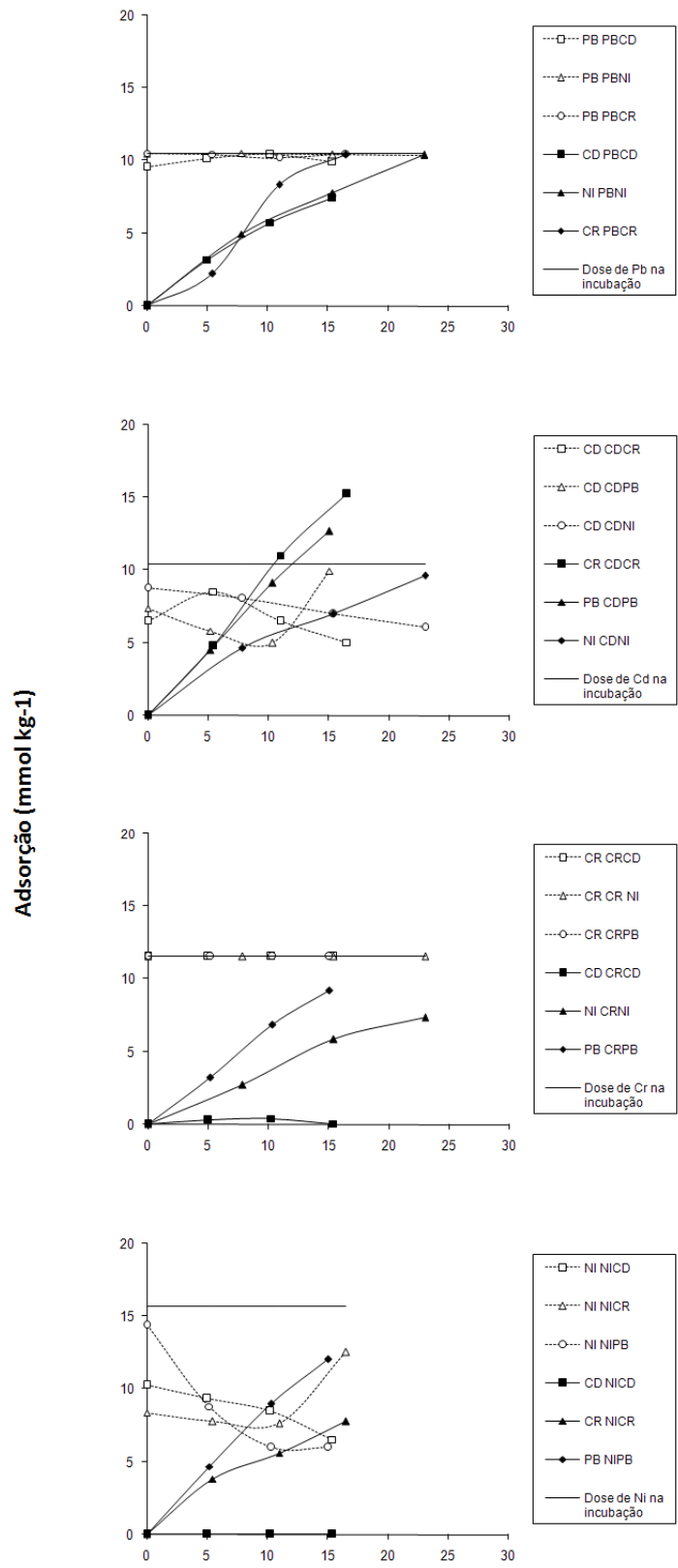
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 5 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



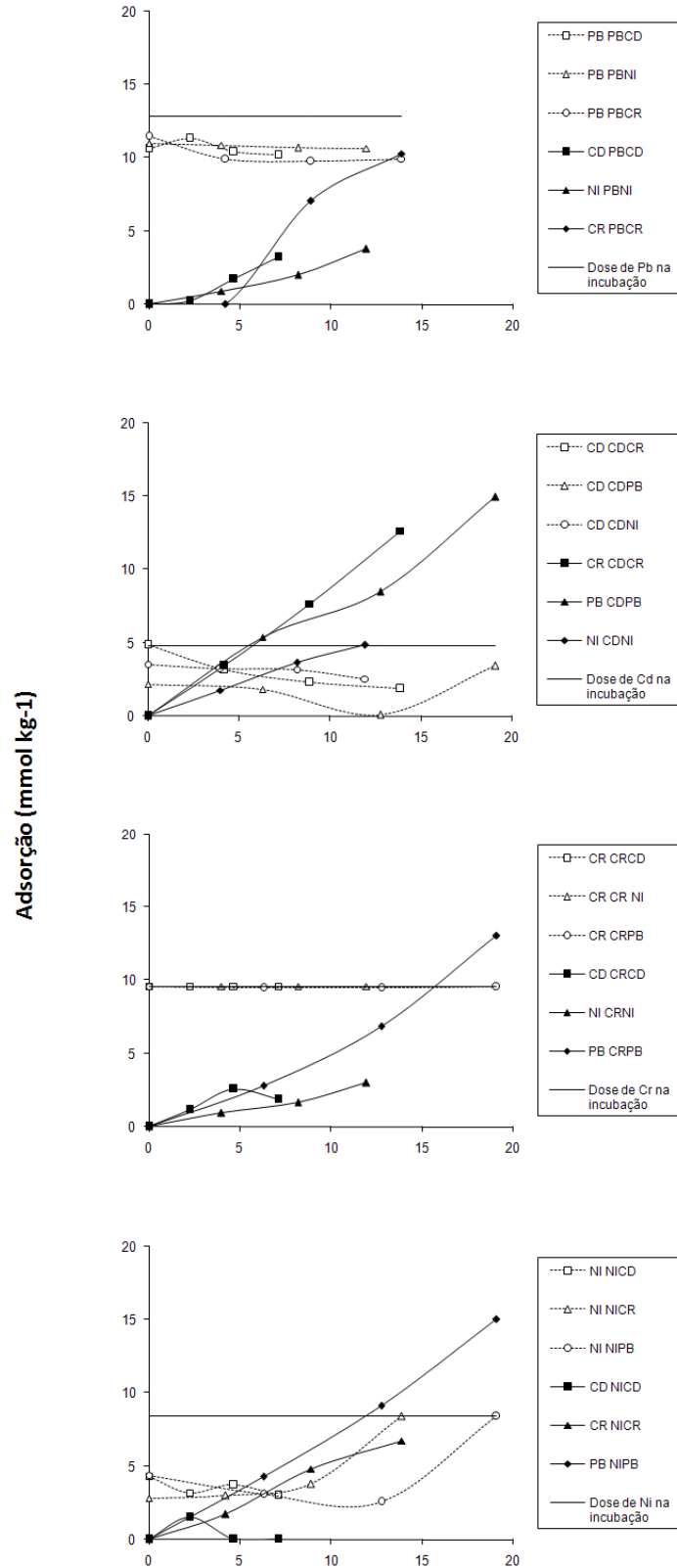
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 6 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



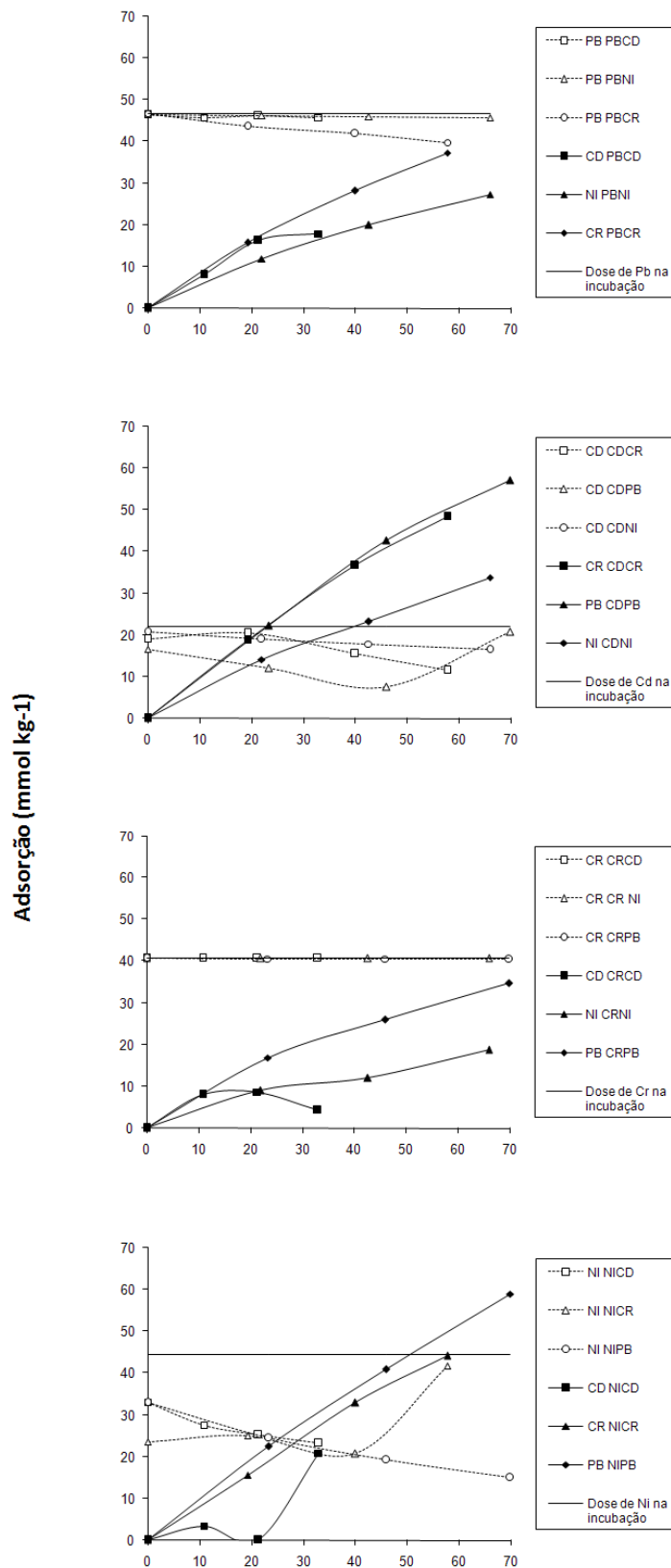
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 7 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



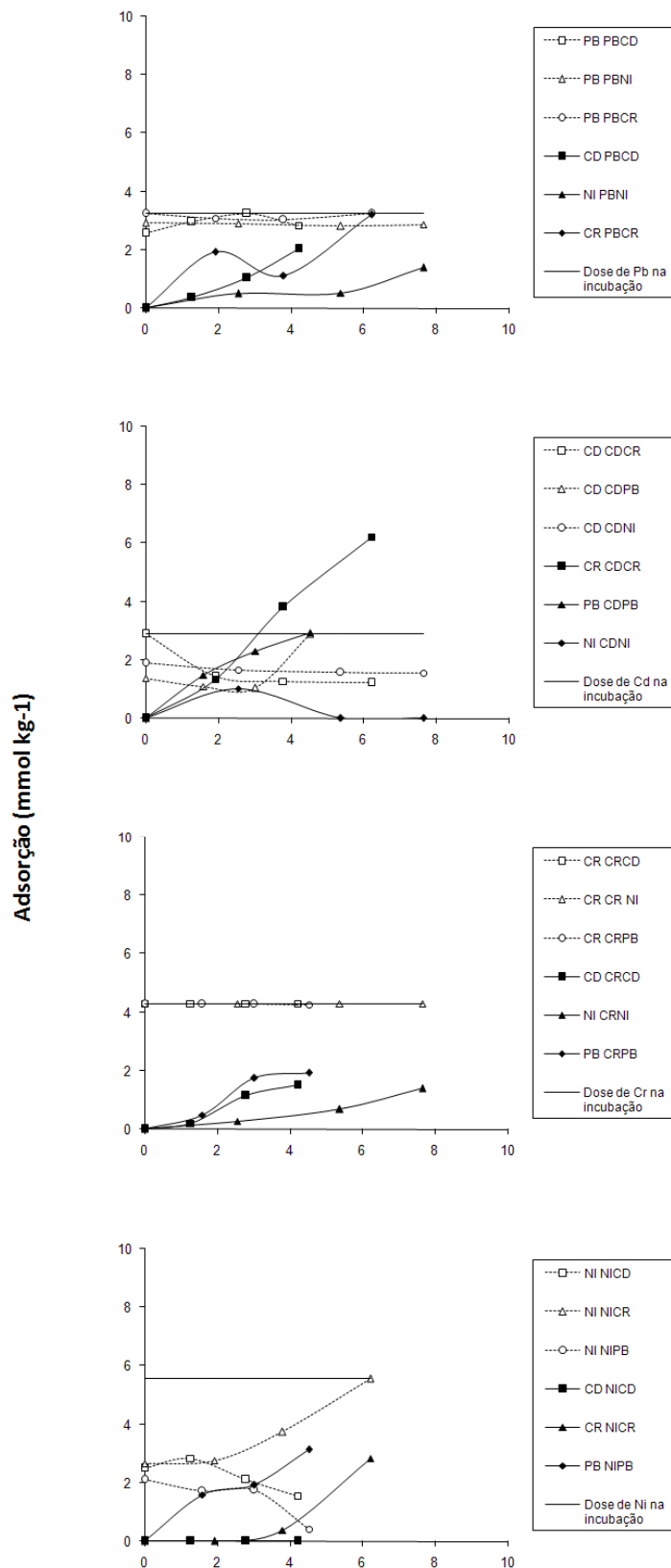
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 8 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



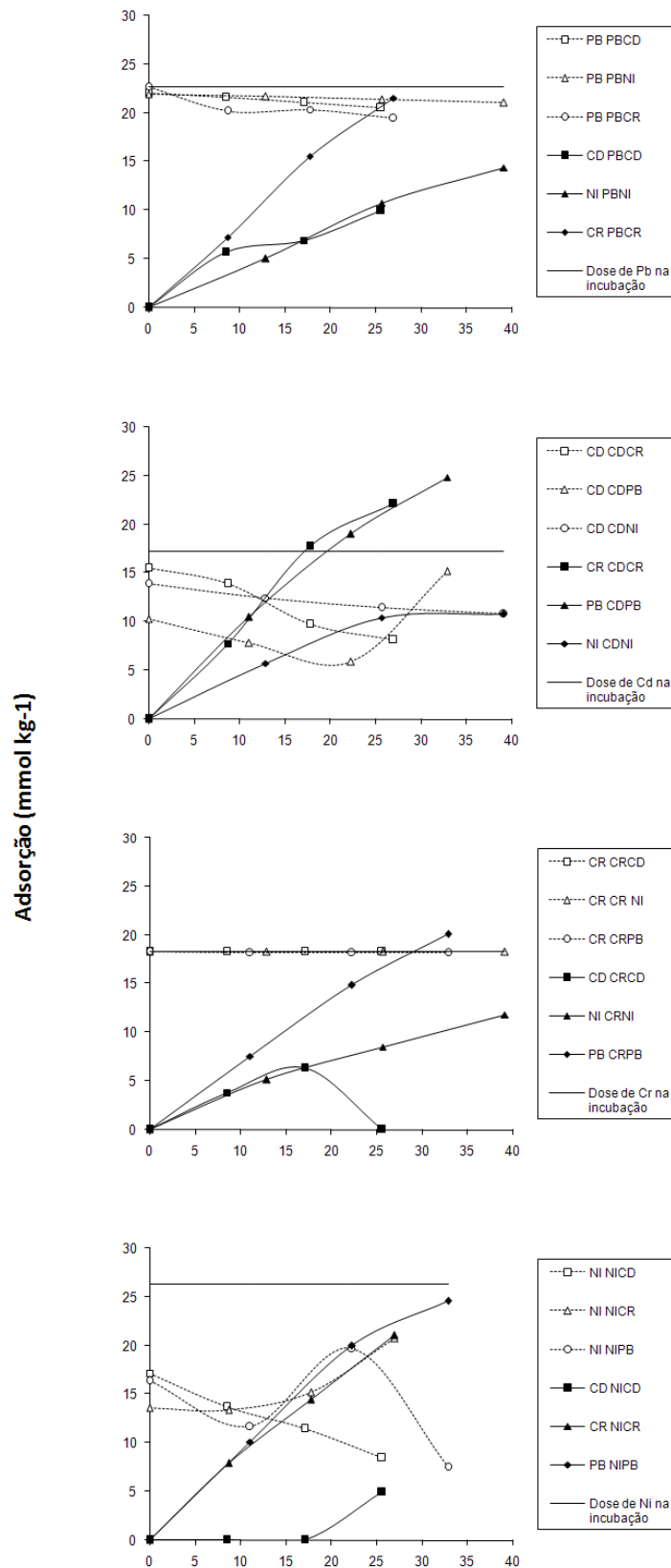
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 9 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



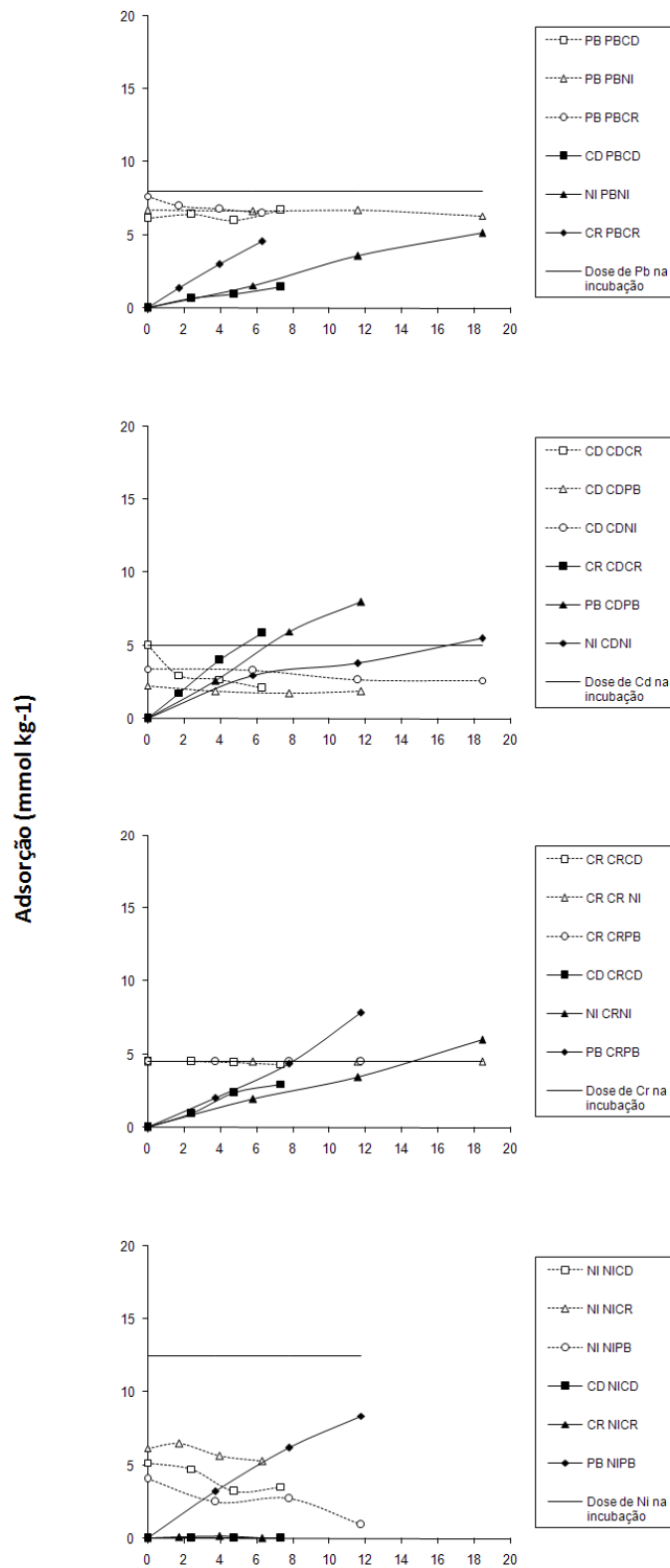
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg^{-1})

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 10 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



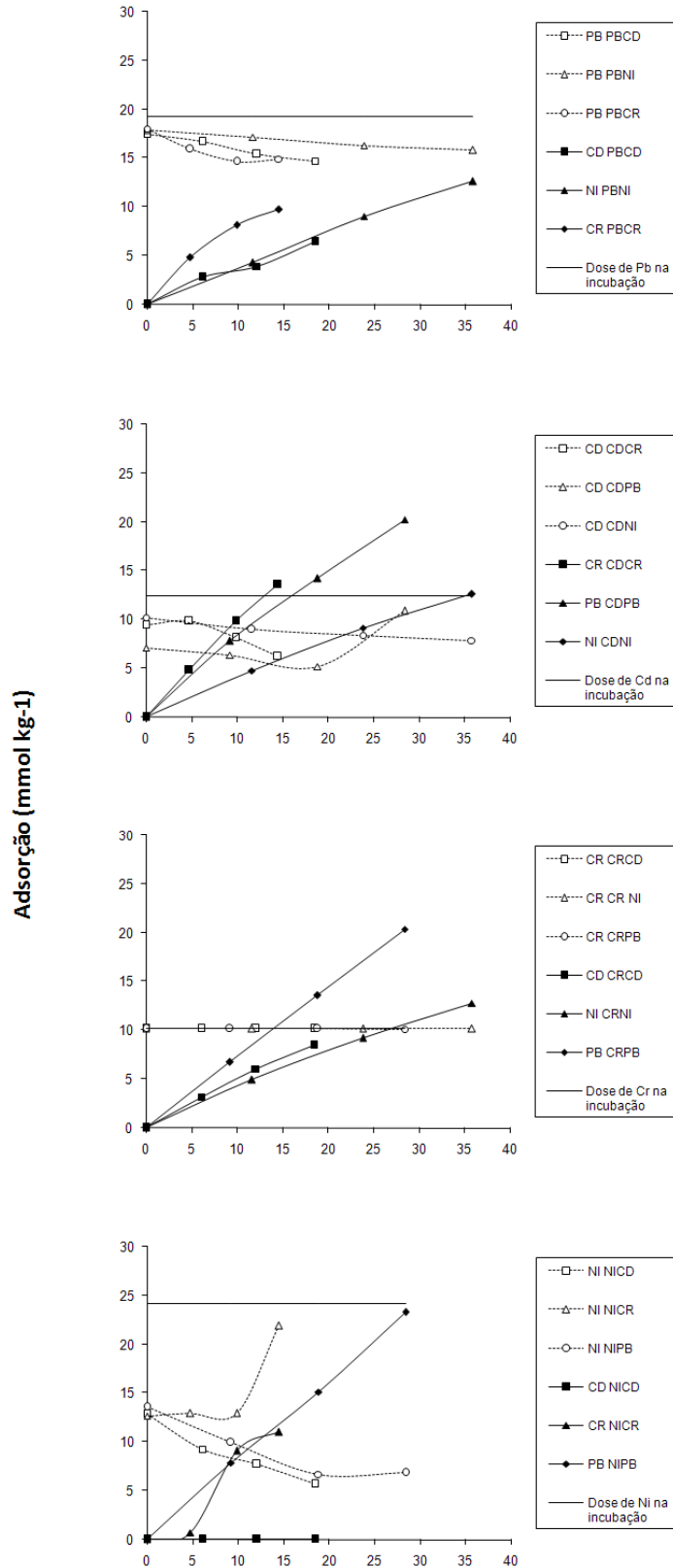
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 11 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



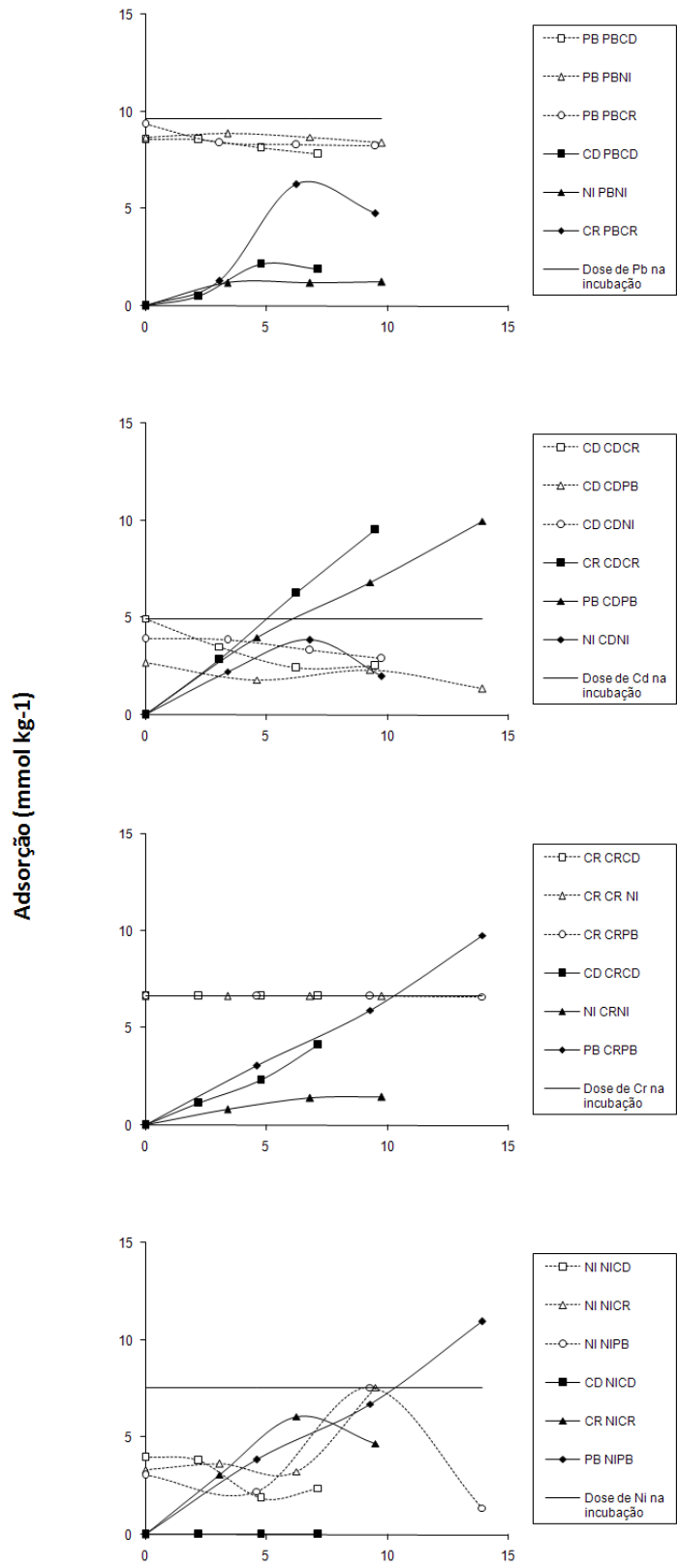
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg^{-1})

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 12 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



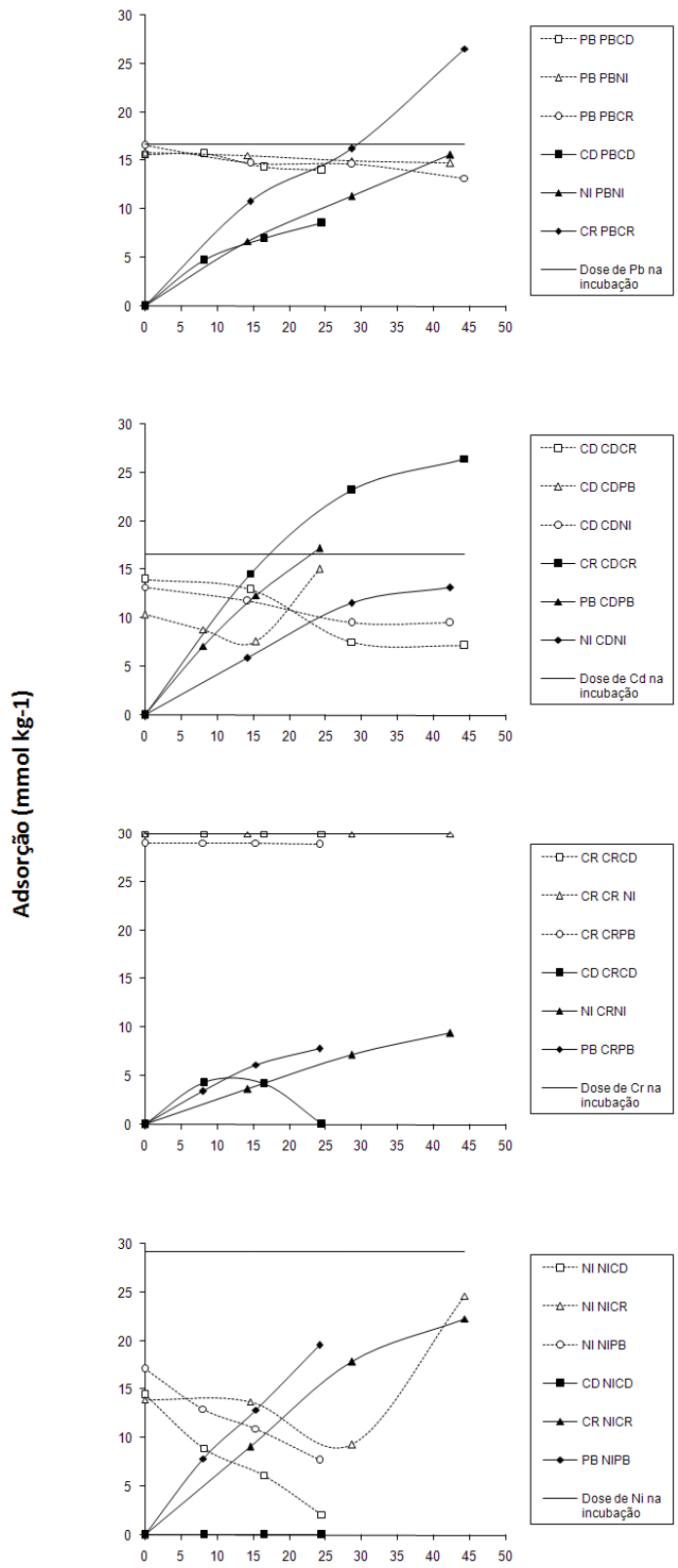
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 13 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



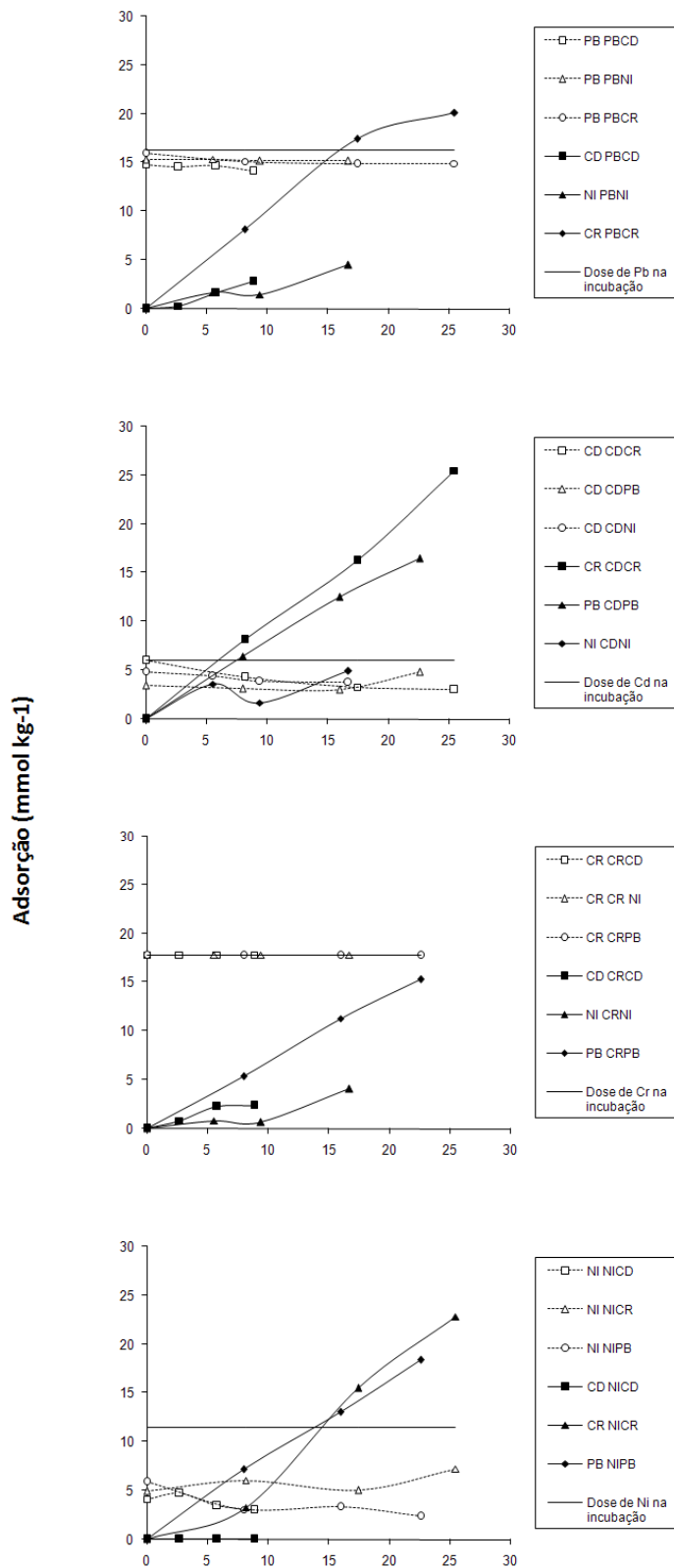
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 14 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



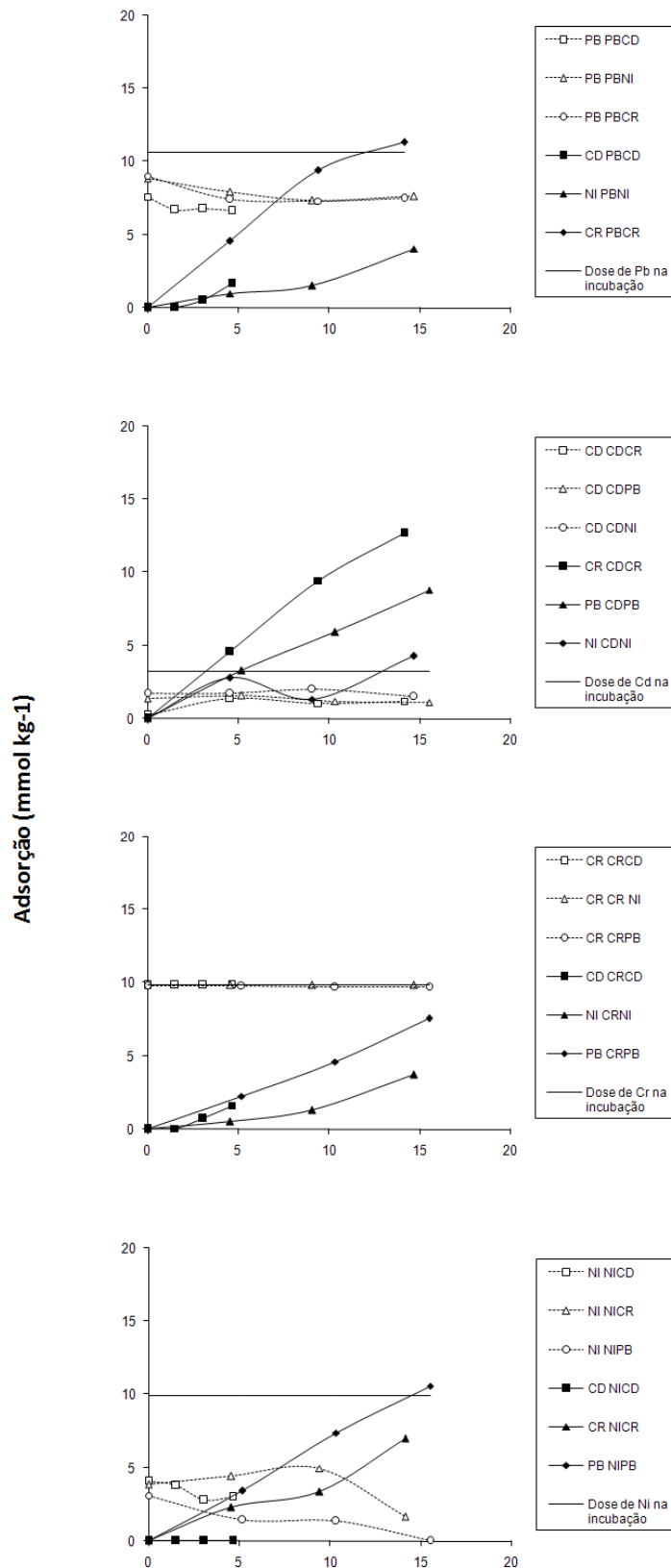
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 15 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



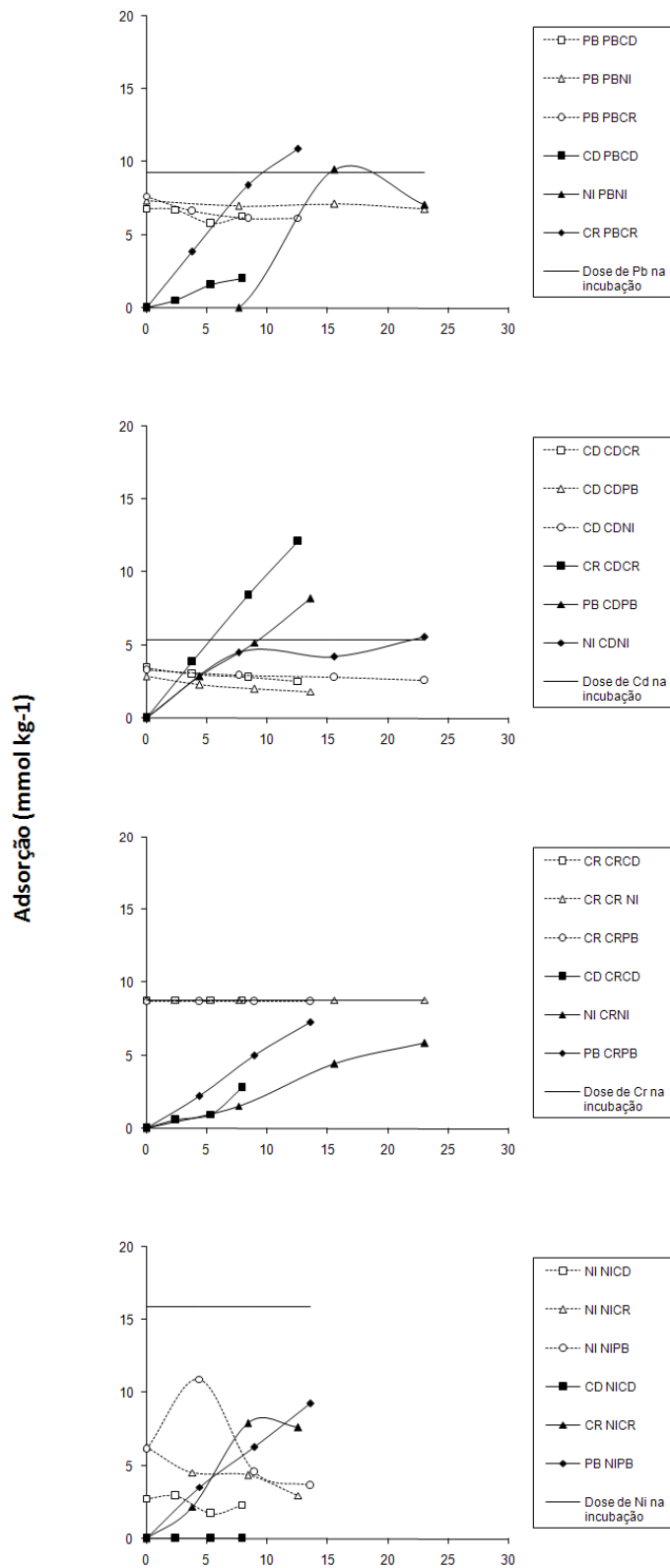
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 16 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



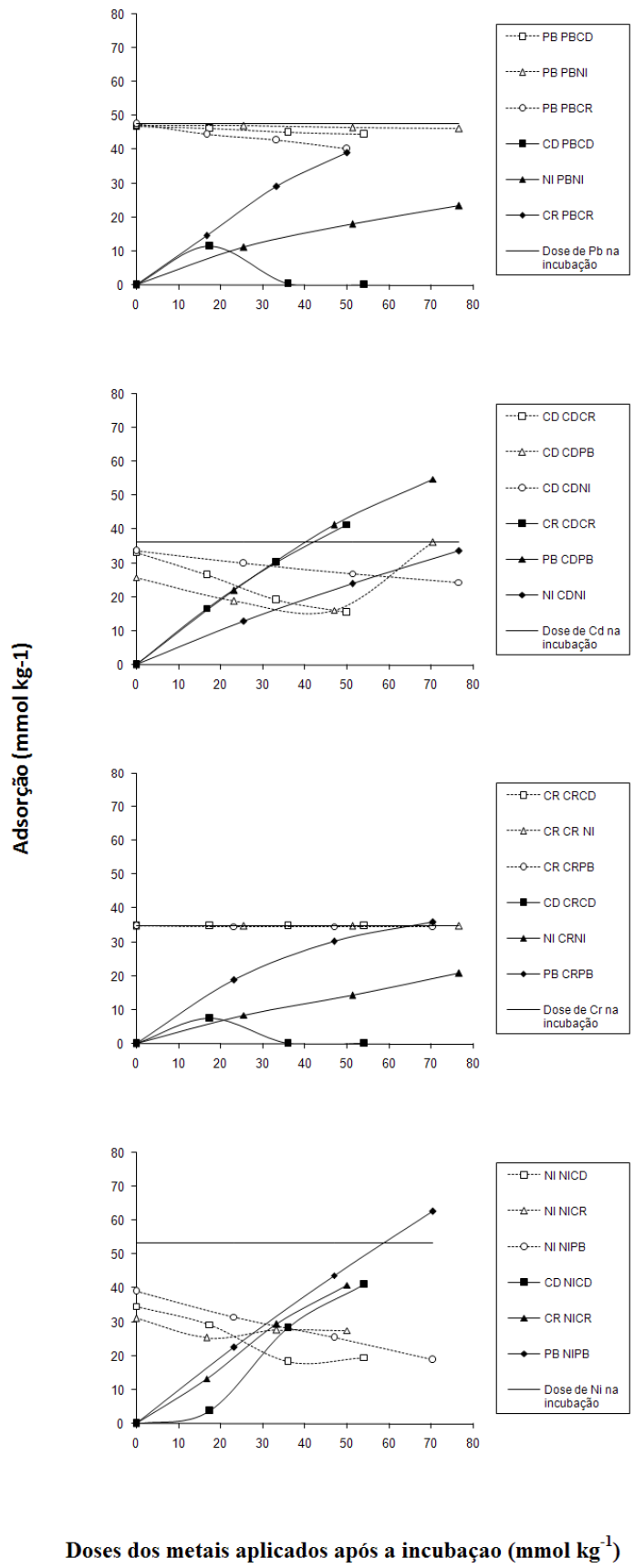
Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 17 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



Doses dos metais aplicados após a incubação (mmol kg⁻¹)

Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 18 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb.



Adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Ni e Pb em decorrência da adição de doses crescentes destes mesmos metais na amostra 19 previamente incubada com a CMA de Cd, Cr, Ni e Pb