



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

**TEORES DE METAIS DISPONÍVEIS E ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLOS DO
ESTADO DO PARÁ**

SANNAH MOHAMAD BIRANI

BELÉM
2010



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

**TEORES DE METAIS DISPONÍVEIS E ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLOS DO
ESTADO DO PARÁ**

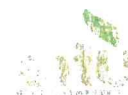
SANNAH MOHAMAD BIRANI

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do programa de pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de “Mestre em Agronomia”.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Rodrigues Fernandes

**BELÉM
2010**

BRASIL 2009
BRASIL 2009



BRASIL 2009

BRASIL 2009

BRASIL 2009

BRASIL 2009

BRASIL 2009

BRASIL 2009

BRASIL 2009

BRASIL 2009

Birani, Sannah Mohamad

Teores de metais disponíveis e atributos químicos em solos do Estado do Pará./ Sannah Mohamad Birani. – Belém, 2010.

114 f.:il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2010.

1. Solo – atributos químicos – Pará (Estado) 2. Solo – metais pesados – Pará (Estado) 3. Extratores químicos 4. Gestão ambiental 5. Amazônia paraense 6. Elementos traços I. Título.

CDD – 631.41098115



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

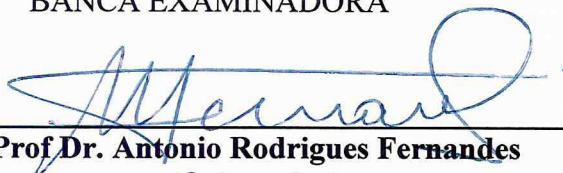
SANNAH MOHAMAD BIRANI

**TEORES DE METAIS DISPONÍVEIS E ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLOS DO
ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do programa de pós-graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Aprovado em 27 de Abril de 2010

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Rodrigues Fernandes
(Orientador)

Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA



Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira
Universidade Federal do Ceará – UFC



Pesquisador Dr. Steel Silva Vasconcelos
Embrapa Amazônia Oriental – EMBRAPA



Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

A Deus, acima de todas as coisas;

AGRADEÇO!

Ao Estado do Pará e todo o povo paraense;

À minha mãe, Maria Lúcia que sempre me apoiou e acreditou em mim;

Aos meus irmãos, Samir e Hannah e meu sobrinho Kauan;

Ao meu namorado Augusto Pedroso, que esteve sempre ao meu lado.

Com Amor e Carinho;

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua presença em minha vida me concedendo força e iluminando meu caminho para conclusão deste trabalho;

A minha mãe e meus irmãos, pela compreensão, atenção e amor mesmo em meus inúmeros momentos de ausência;

Ao meu orientador prof. Dr. Antonio Rodrigues Fernandes pela confiança depositada, ensinamentos e amizade;

Ao meu querido namorado Augusto Pedroso, pela cumplicidade em minhas vontades, por me dar forças nos momentos de fraqueza, e principalmente pelo carinho e atenção dedicada a mim sem seu imensurável apoio eu não teria conseguido concluir este trabalho;

À Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA e todo seu corpo docente e funcionários, pela oportunidade de realizar este curso aperfeiçoando meus conhecimentos;

À coordenação do Programa de Pós-Graduação, pela confiança e oportunidade oferecida;

A CAPES pela concessão de bolsa e apoio financeiro do PROCAD;

As amigas Patrícia Ribeiro Maia, Elaine Rodrigues Santos, Elaine Maria Silva Guedes, Clévea Rosana Ferreira da Silva e Mariana Nascimento Delgado Oliveira, Adriane da Rocha pelo companheirismo e amizade, nos momentos de alegria e tristeza no decorrer do curso;

As colegas e amigos de turma, em especial, Andréia Saldanha, Ângela Braga, Alessandra Moraes, Bruno Brabo, Daniel Pinheiro, Fabrícia Moraes, Hérica Oliveira, Joseane Castro, Josemar Vasconcelos, Kaliene Carvalho, Marcos Albuquerque, Mariana Oliveira, Walmir de Carvalho;

Ao Eng. Agrônomo Jessivaldo Galvão, pelo apoio no trabalho e amizade;

Aos professores Norberto Noronha, Mário Lopes da Silva Júnior, Marcos André Piedade Gama, Herdjânia Veras de Lima, Ana Regina Araújo, pelos importantes ensinamentos repassados durante as disciplinas ministradas na Pós-graduação;

Ao Prof. Dr. Luis Reynaldo Ferraciu Alleoni, pela oportunidade de realização de todas as análises referentes ao meu trabalho, mediante acordo de cooperação entre o Programa de Pós-

Graduação em Agronomia da UFRA e o Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP– PROCAD.

Ao técnico de laboratório Luiz Antonio Silva Junior pela amizade, prestatividade e convivência nos cinco meses e meio de trabalho no Laboratório de química da ESALQ/USP.

Aos demais colegas orientados pelo Prof. Alleoni, Leônidas Melo, Benedito Correia, Susana Churka, Mariana Gabos; Roberta Nogueirol. Em especial, Alexys Boim e Cintia Masuco Lopes.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

REFERENCIAL TEÓRICO

1	RESUMO	
1.1	INTRODUÇÃO GERAL	15
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.2.1	O solo e metais pesados	18
1.2.2	Definição de metais pesados	19
1.2.3	Origem dos metais pesados	20
1.2.4	Biodisponibilidade e comportamento químico no solo	22
1.2.5	Qualidade ambiental do solo e metais pesados	24
	REFERÊNCIAS	27

CAPÍTULO 2

TEORES DE METAIS DISPONÍVEIS EM SOLOS DO ESTADO DO PARÁ

	RESUMO	34
	ABSTRACT	35
2.1	INTRODUÇÃO	36
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	38
2.2.1	Coletas das amostras	38
2.2.2	Preparação das amostras	41
2.2.3	Análises de atributos químicos	42
2.2.4	Análises de metais	42
2.2.5	Análises estatísticas	43
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
2.3.1	Análises descritivas dos teores de metais	44
2.3.2	Correlações entre os metais	53
2.3.3	Correlações entre os metais e os atributos do solo	58
2.4	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65

CAPÍTULO 3

ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DO ESTADO DO PARÁ, EM CONDIÇÕES NATURAIS

3.1	RESUMO	73
3.2	ABSTRACT	74
3.3	INTRODUÇÃO	75
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	76
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
3.5.1	Latossolos	77
3.5.2	Argissolos	84
3.5.3	Demais classes (Nitossolo, Plintossolo, Neossolo, Gleissolo E Cambissolo)	86
3.5.4	Análise de correlação	89
3.6	CONCLUSÃO	92
3.7	REFERÊNCIAS	93

Tabela 12 - Estatística descritiva da fertilidade dos solos naturais do Estado do Pará na profundidade 1.....	80
Tabela 13 - Estatística descritiva da fertilidade dos solos naturais do Estado do Pará na profundidade 2.....	82
Tabela 14 - Coeficientes de correlações entre os atributos químicos dos solos naturais do Estado do Pará.....	91

CAPÍTULO 1

TEORES DE METAIS DISPONÍVEIS E ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLOS DO ESTADO DO PARÁ

BIRANI, Sannah Mohamad. Teores de metais disponíveis e atributos químicos em solos do Estado do Pará: UFRA, 2010. 114 p (Dissertação – Mestrado em Agronomia).

RESUMO: O estudo dos metais pesados requer uma abordagem adequada em decorrência dos possíveis impactos que estes elementos podem causar no ambiente, assim como na sociedade que dele depende. No Estado do Pará, estudos de quantificação dos teores de metais pesados disponíveis, ainda são incipientes. Dessa forma, objetivou-se com este trabalho determinar os teores disponíveis de metais pesados em solos do Estado do Pará, em condições naturais, por meio de três extratores; correlacionar esses metais com alguns atributos dos solos e caracterizar do ponto de vista químico, os solos representativos do Estado do Pará. Foram coletadas amostras de solos em duas profundidades, em áreas com vegetação natural e/ou com nenhuma ou mínima intervenção antrópica, perfazendo um total de 264 amostras. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de inox de malha de 2 mm, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Foram determinados os atributos químicos e os metais disponíveis por meio dos extratores Mehlich-I, Mehlich-III e DTPA. Os metais pesados determinados neste estudo foram: Ba, Cd, Cr, Pb, Cu, Mn, Ni, e Zn. Os metais pesados dos extratos produzidos foram dosados por espectrometria de emissão óptica em plasma com acoplamento induzido (Mehlich III e DTPA) e pela absorção atômica (Mehlich I). Os resultados foram processados utilizando procedimentos da estatística descritiva e correlações de Pearson entre os metais, atributos do solo. Os teores disponíveis, bem como os valores de referências para os metais pesados nos solos do Estado do Pará, determinados pelos três extratores foram inferiores aos valores de referência estabelecidos pela CETESB. Correlações significativas foram obtidas entre os metais e os atributos: pH, matéria orgânica e CTC. O pH apresentou correlação negativa com Al nos três extratores. Não foram encontradas correlações entre a fração argila e a maioria dos metais estudados. As amostras de solos analisadas apresentam diferença nas características químicas em função das diferentes classes e das profundidades. Os valores determinados representam bem o teor natural das respectivas classes de solos (Latossolo, Argissolo, Nitossolo, Gleissolo, Neossolo e Plintossolo) e, que os mesmos, possam contribuir para o monitoramento dos solos do Estado do Pará, visando uma melhor gestão ambiental de sua qualidade.

Palavras-Chave: Extratores, gestão ambiental, Amazônia paraense, elementos traços.

ABSTRACT: The heavy metals studies request an appropriate approach due to impacts that these elements may bring to the environment, as to the society that depends on it. At Para State, studies quantifying the levels heavy metals that aim to obtain the values of available are yet incipient. In this way, this research is concerned in determine the available content of heavy metals in Para's soil in natural conditions, through three extractors; correlate those metals with some soil attributes and characterize the representative soils of Para State from the chemicals point of view. Soil samples of different depth were collected in areas of natural vegetation and/or with any or minimum anthropic intervention, what make a total of 264 samples. The samples were dried on air, unclodded and sieved on a mesh of 2 mm to obtain thin soil dried on air (TSDA). The chemical analysis was made and determined the available metals through the extractors: Mehlich-I, Mehlich-III and DTPA. The heavy metals determined on this research were: Ba, Cd, Cr, Pb, Cu, Mn, Ni and Zn. The heavy metals of the produced extracts were dosed by spectrometry of optical emission in plasma with induced coupling (Mehlich-III e DTPA) and through the atomic absorption (Mehlich-I). The results were processed using proceeds of descriptive statistics and Pearson correlations among metals, and soils attributes. The available content as the references values for heavy metals in Para State soils determined by the three extractors was inferior to the values of reference established by CETESB. Significant correlations were obtained between metals and the attributes: pH, organic matter and CTC. The pH presented negative correlation with Al in the three extractors. Correlations between the clay's fraction and the majority of determined metals were not found. The analyzed soil samples present a difference on the chemical characteristics according to different classes and depth. The determined values represent the natural reality of the following soil classes (Ferralsol, Acrisol Nitisol, Gleysol, Arenosol and Plinthosol) and they may contribute to the Para State Soils Monitoring what aims a better environmental quality management.

Key-words: Extractors, Environmental management, Para's amazon, trace elements

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Os solos possuem extrema importância ao homem, principalmente em razão do seu uso como recurso básico para produção de alimentos, fibras e várias outras matérias primas. Atualmente, os metais pesados têm sido estudados no solo, por estarem relacionados à poluição ambiental, sendo importante o conhecimento dos possíveis impactos que estes elementos podem causar no ambiente e na sociedade humana que dele depende. O termo metal pesado, agrupa os elementos químicos inorgânicos que possuem densidade $> 5 \text{ g cm}^{-3}$, e são assim denominados por causarem impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente (ALLOWAY, 1990).

Os metais pesados estão diretamente ligados à gênese do solo, pois são componentes naturais dos minerais de solos oriundos das rochas, ocorrendo normalmente em baixas concentrações, não representando assim, em condições naturais, riscos para a humanidade e para vida animal. Os solos naturalmente possuem metais pesados em concentrações variadas, dependendo do material de origem, dos processos de formação e da composição e proporção dos componentes da sua fase sólida (CAMARGO et al., 2003; FADIGAS et al., 2006). Embora sejam comuns na natureza, as atividades humanas têm contribuído para o aumento do nível dos metais em muitos ecossistemas naturais, atribuídos ao uso intensivo dos recursos naturais, ao crescimento industrial, urbano e de atividades relacionadas à agricultura, pecuária e extração mineral.

Sob o ponto de vista ambiental, o solo não é somente a fonte de nutrientes, mas também um “filtro” para remoção de contaminantes. Sua capacidade depuradora reflete seu padrão de qualidade e envolve a funcionalidade do solo no seu máximo potencial com relação à manutenção da biodiversidade, da qualidade da água e do ar (CETESB, 2001). No entanto, é necessário se atentar ao fato de que essa capacidade de atenuação é limitada e muitos desses elementos químicos podem apresentar em suas composições elevadas concentrações, podendo provocar alterações na qualidade do solo, com sua consequente contaminação ou ainda poluição.

Quando um elemento químico chega ao solo, ele passa a interagir juntamente com os componentes do meio, participando dos sistemas de equilíbrio que atuam no solo. Para os elementos inorgânicos como os metais pesados, os atributos químicos dos solos retêm estes elementos em sua matriz orgânica e inorgânica, reduzindo a disponibilidade dos mesmos e

possíveis impactos causados por sua mobilidade. No caso dos elementos orgânicos, há participação dos atributos biológicos do solo que imobilizam, quelatizam estes elementos, eliminando ou minimizando sua toxicidade. Portanto, o conhecimento das formas químicas dos metais permite avaliar a potencial mobilidade desses metais e seus riscos ao ambiente.

Em muitos países desenvolvidos já existem estudos dos valores orientadores de metais os quais determinam a entrada máxima aceitável, dos elementos químicos perigosos, dentre eles os metais pesados, de acordo com suas condições climáticas. Um dos requisitos para a determinação destes valores é a obtenção da faixa de teores mínimos em amostras de solos em condições naturais, coletadas em locais preservados, sem interferência antrópica. De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2005), para as substâncias inorgânicas de interesse ambiental que ocorrem naturalmente nos solos, os valores orientadores de referência são definidos a partir do “background” da área, levando em consideração a variação dos atributos do solo. Desta forma, o monitoramento ambiental e da extensão da poluição de uma área, somente será possível se forem comparados os teores totais de metais pesados encontrados em um solo com aqueles determinados em condições naturais (CETESB, 2001).

De modo geral, são usados os teores totais de metais pesados para indicar a necessidade de intervenção ou investigação de áreas contaminada. No entanto, alguns autores questionam a validade do uso dos teores totais para fins regulatórios, pois no caso de um elemento representar um perigo iminente de contaminação e poluição ambiental é necessário conhecer em que forma ele se encontra no solo, uma vez que sua mobilidade e fitodisponibilidade e, conseqüentemente a entrada na cadeia alimentar, irão depender dessas formas (CAMARGO et al., 2001). Portanto, na fase de investigação de valores anômalos em áreas suspeitas, deve-se atentar também para análises de teores biodisponíveis no solo, além dos teores totais.

No Estado do Pará, pesquisas visando a obtenção dos teores disponíveis de metais pesados nos solos são incipientes. Dessa forma, a determinação de valores disponíveis ainda inexistentes no Estado do Pará, se constituirá num passo importante, para o estabelecimento de valores referências, visando o monitoramento ambiental e a extensão da poluição, com previsão de riscos em áreas antropizadas, principalmente aquelas com atividades agrícolas, de mineração e disposição de resíduos sólidos industriais e urbanos.

As hipóteses consideradas foram: Os diferentes solos estudados darão teores de metais pesados diferenciados quando obtidos pelos métodos de extração disponíveis; há

correlação entre os teores de metais disponíveis e os atributos dos solos e há diferença entre os atributos químicos das diferentes classes de solos do Estado do Pará.

Objetivou-se com esse trabalho: 1. determinar os teores disponíveis, de metais pesados em solos do Estado do Pará, por meio de três extratores; 2. estudar a correlação dos teores de metais com atributos do solo. 3. caracterizar quanto aos atributos químicos, os solos representativos do Estado do Pará.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2.1 O solo e metais pesados

O solo é um meio heterogêneo e complexo e o seu estudo em diferentes escalas é um método eficiente para entender a complexidade do sistema solo. Um solo com alta qualidade é aquele apto a garantir uma alta produção agrícola, a sustentabilidade ou a otimização da produção e maximização dos lucros. Essa abordagem vai ao encontro do significado mais simples e compreensível do recurso solo que é de atuar como fonte de suporte natural para as plantas para produção de fibras e alimentos (SOARES, 2004). Entretanto, sob o ponto de vista ambiental, o solo possui característica única quando comparada a outro componente da biosfera, pois se apresenta não apenas como um dreno para contaminantes, mas também como tampão natural que controla o transporte de elementos químicos e outras substâncias para atmosfera, hidrosfera e biota (BOLAN et al., 1999).

A sociedade usa o solo para a disposição de resíduos sólidos industriais e urbanos, águas residuárias e resíduos industriais químicos, com isto os minerais e a fauna do solo precisam funcionar como agentes filtrantes, e tamponando, imobilizando os materiais poluentes orgânicos e inorgânicos nele depositados. Um dos principais fatores atuais em questão que podem ocasionar a diminuição da funcionalidade do solo é a presença de “metais pesados”.

A qualidade dinâmica do solo é a forma com que o solo se altera frente às estratégias de manejo ao uso do solo. O tipo de solo, o relevo, a geologia e os processos erosivos influenciam a concentração e distribuição dos metais pesados no ambiente, afetando inclusive sua biodisponibilidade (RAMALHO; AMARAL SOBRINHO; VELLOSO, 2000). Contudo, devido à poluição do solo por metais pesados ocasionar o decréscimo de sua funcionalidade, é imprescindível que os solos sejam tratados cuidadosamente de modo a aumentar sua sustentabilidade para futuras gerações, e um dos constantes desafios da ciência do solo é estabelecer estratégias que atendam a multifuncionalidade desse recurso.

1.2.2 Definição de metais pesados

O termo metal pesado, embora não seja de fácil definição, é utilizado e reconhecido mundialmente. Por definição, esse termo tem sido usado frequentemente para tratar de um grupo heterogêneo de elementos químicos (metais, não metais e alguns semi-metais) com densidade atômica maior do que 5 g cm^{-3} ou que possuem número atômico maior que 20 (MARQUES; CURI; SCHULZE, 2002).

Porém, a definição do termo metal pesado tem sido muito criticada e considerada controversa; entretanto, é mencionada em referências bibliográficas para designar elementos classificados como poluentes do ar, da água, do solo, das plantas e dos alimentos e que geralmente são tóxicos aos organismos vivos (PUNZ; SIEGHARDT, 1993). Elementos traços são considerados os elementos constituintes da crosta terrestre cuja concentração é inferior a 100 mg kg^{-1} (ALLOWAY, 1995). Portanto, é uma denominação dada aos elementos encontrados naturalmente em baixas concentrações no solo, nas plantas e em águas naturais.

Os metais pesados diferem de outros agentes tóxicos porque não são sintetizados e nem destruídos pelo homem. As atividades industriais diminuem significativamente a permanência desses metais nos minérios, bem como a produção de novos compostos, além de alterar a distribuição desses elementos no planeta.

Apesar do termo metal pesado ter conotação de toxicidade, alguns destes elementos atendem aos critérios de essencialidade às plantas, aos animais e ao homem e são ditos biogênicos, isto é, sua presença é essencial para permitir o funcionamento normal de algumas rotas metabólicas (AGUIAR; NOVAES; GUARINO, 2002). Crômio (Cr), manganês (Mn), ferro (Fe), cobalto (Co), cobre (Cu), zinco (Zn), selênio (Se) e molibdênio (Mo) são elementos essenciais à fisiologia humana (SCHROEDER, 1966). Outros, como mercúrio (Hg), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e arsênio (As), são altamente tóxicos aos seres humanos, mesmo quando presentes em baixas concentrações e respondem pela maioria dos problemas de saúde devido à poluição do meio ambiente (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1996).

O efeito danoso dos metais pesados depende basicamente da quantidade acumulada e de suas formas químicas no solo. A ocorrência dos metais pesados em formas solúveis, trocáveis, oclusas, precipitadas ou complexadas é que define o potencial poluidor e o impacto na qualidade do solo e água e toxicidade para plantas e outros organismos. Entre os elementos presentes no ambiente, os mais potencialmente tóxicos às plantas e aos animais são: As, Cd,

Pb, Hg, Co, Cu, Cr, Ni, Se e Zn (NELLESSEN; FLETCHER, 1993). Apesar dos elementos Se e As serem classificados como não metais e semimetal, respectivamente, os princípios que regem seu comportamento no solo são similares aos dos metais.

Normalmente, o aumento dos metais pesados no ambiente ocorre devido às atividades humanas (deposição de resíduos sólidos e industriais, agrícolas e práticas de mineração). A contaminação do solo por elementos inorgânicos é um problema sério, pois causa estresse e desarranjos fisiológicos que afetam o crescimento e o desenvolvimento das plantas, embora espécies demonstrem diferentes respostas à intoxicação por metais (AZEVEDO; PINTO; SANTOS, 2005). Plantas estressadas por íons metálicos mostram alterações morfológicas e bioquímicas em nível de células ou tecidos vegetais, assim como diminuição direta em seu desenvolvimento (SINGH; SINHA, 2004).

1.2.3 Origem dos metais pesados

Os elementos metálicos estão presentes naturalmente em solos e em sistemas aquáticos superficiais e subsuperficiais, mesmo não havendo ação antrópica no ambiente. O aumento em sua concentração pode ocorrer tanto em razão de processos naturais, quanto por atividades humanas. Portanto, quanto à origem, os metais presentes nos solos podem ser classificados como litogênicos e antropogênicos (CAMARGO; ALLEONI; CASAGRANDE, 2001).

Em relação aos processos naturais, nos sistemas aquáticos, a fração litogênica destes elementos é originada pela decomposição das rochas e lixiviação no perfil do solo, até que encontrem seus destinos finais nos oceanos e sedimentos (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1984). Os níveis naturais (“background levels”) de metais pesados nos solos dependem principalmente do material de origem do qual o solo foi originado. Dessa forma, a solubilização das rochas e, conseqüentemente, sua lixiviação no solo constituem os processos naturais para a presença de metais em solos e águas (Tabela 1). No entanto, quanto mais intemperizado e desenvolvido for o solo, menor será a influência da rocha parental (ZHANG; DENG; YANG, 2002).

Tabela 1- Conteúdo médio natural de elementos potencialmente tóxicos nos principais tipos de rochas e na solução do solo.

Elemento	Crosta Terrestre	Rochas Ígneas			Rochas sedimentares			Solução do solo
		Ultramáficas	Máficas	Graníticas	Carbonatos	Arenitos	Folhelhos	
		-----mg kg ⁻¹ -----						mmol L ⁻¹
As	1,5	1	1,5	1,5	1	1	13	0,01
Cd	0,1	0,12	0,13	0,009	0,028	0,05	0,22	0,04
Co	20	110	35	1	0,1	0,3	19	0,08
Cr	100	2980	200	4	11	35	90	0,01
Cu	50	42	90	13	5,5	30	39	1
Hg	0,05	0,004	0,01	0,08	0,16	0,29	0,18	0,0005
Ni	80	2000	150	0,5	7	9	68	0,17
Pb	14	14	3	24	5,7	10	23	0,005
Se	0,05	0,05	0,13	0,05	0,03	0,01	0,5	0,06
Zn	75	58	100	52	20	30	120	0,08

Fonte: Soares (2004) adaptado de Alloway (1990) e Wolt (1994).

Existem diferenças entre os teores de metais pesados nos solos em razão do material de origem que sofre influência marcante dos processos pedogenéticos. Rochas ígneas, sedimentares e metamórficas possuem diferenças significativas entre os teores de metais pesados ditando os valores naturais destes elementos nos solos (ALLOWAY, 1990; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001). Os metais geralmente ocorrem em baixas concentrações e formas não disponíveis, não representando, em condições naturais, riscos para o homem, planta e animais (ALLOWAY, 1990; STEVENSON; COLE, 1999; COSTA et al., 2004; KABATA-PENDIAS, 2004).

A relação do solo com o material de origem é bastante evidenciada quando o primeiro é formado “in situ”, tornando-se menos expressiva nos solos originados sobre materiais previamente intemperizados. Solos originados de rochas básicas, naturalmente mais ricos em metais, apresentam maiores teores desses elementos, quando comparados com aqueles formados sobre granitos, gnaisses, arenitos e siltitos (VALADARES, 1975; ROVERS; CAMARGO; VALADARES, 1983; OLIVEIRA, 1996). Além disso, esses solos também apresentam maior potencial para disponibilizar metais para as plantas, em comparação com os desenvolvidos de gnaiss e arenito mais sedimentos do terciário (OLIVEIRA, 1996). As concentrações médias relatadas de metais no mundo são variadas em decorrência da diversidade de solos e dos diferentes métodos de extração e análises utilizadas (ABREU; ABREU; BERTON, 2002).

No Brasil as principais classes de solos (Latosolos e Argissolos), em condições naturais, obtidas da soloteca Embrapa Solos (RJ), correspondentes aos horizontes A e B de 81 perfis, foram caracterizadas quanto aos teores pseudototais de metais pesados (Cu, Zn, Co, Fe, Mn, Cd, Cr, Ni) e foram correlacionados esses teores com as propriedades do solo (CTC, teores de argila, silte, Mn e Fe) (FADIGAS et al., 2006). Em geral, os teores médios totais foram inferiores aos valores médios encontrados em referências bibliográficas internacionais, com exceção do Cd, e inferiores aos valores considerados tóxicos para as plantas, inclusive para o Cd. Amostras de solos semelhantes foram agrupadas, utilizando como variáveis as propriedades do solo. A partir desses agrupamentos, foi possível definir faixas de teores dos metais nos grupos de solos e obter uma aproximação de valores naturais dos metais para outras amostras de solos com características similares às de cada grupo.

As principais fontes antropogênicas de metais no ambiente são fertilizantes, pesticidas, água de irrigação contaminada, queima de biomassa na zona rural, combustão de carvão e óleo, emissões veiculares, deposição de resíduos urbanos e industriais e, principalmente, curtumes, mineração, fundição e refinamento de metais.

No ambiente, os metais pesados tendem a acumular-se, provocando a elevação constante de seus níveis. Dessa forma, os solos são utilizados como receptores dos resíduos provenientes de atividades humanas, atuando frequentemente como um filtro, tendo a capacidade de depuração e imobilizando grande parte das impurezas nele depositadas. No entanto, essa capacidade é limitada, podendo ocorrer alteração da qualidade do solo em virtude do efeito cumulativo da deposição de poluentes atmosféricos, da aplicação de defensivos agrícolas e fertilizantes e da disposição de resíduos sólidos industriais, urbanos, materiais tóxicos e radioativos (MOREIRA-NODERMANN, 1987; CETESB, 2001).

1.2.4 Biodisponibilidade e comportamento químico no solo

Embora a biodisponibilidade de metais pesados seja um importante e constante assunto em discussão, a base científica para o seu adequado uso na avaliação de riscos ambientais em locais contaminados ainda é controversa. No entanto, é importante determinar a disponibilidade de metais pesados nos solos, visto que o teor total não apresenta

uma visão detalhada da mobilidade dos elementos e da sua biodisponibilidade aos vegetais e microorganismos.

Para avaliar o possível efeito tóxico dos metais pesados no solo é necessário conhecer a dinâmica de suas formas químicas, assim como aquelas capazes de facilitar a assimilação pelas plantas ou animais. A denominação de biodisponibilidade refere-se à fração do metal pesado no solo disponível à absorção pelos organismos biológicos de forma específica para cada via entrada, tempo de exposição e tipo de matriz contendo o metal pesado, sendo um atributo difícil de ser avaliado (PEIJNENBURG; JAGER, 2003).

Os compartimentos de metais mais biodisponíveis e menos biodisponíveis são controlados por reações de adsorção, complexação, precipitação e oxirredução. Dessa forma, os elementos metálicos podem estar adsorvidos às partículas do solo ou estar presentes como íons livres ou como complexos organominerais. Acredita-se que o íon livre em solução é a forma mais disponível e tóxica dos metais pesados para as plantas e organismos vivos, além de ser a forma mais móvel (PARKER; PEDLER, 1997).

Dentre os atributos do solo que afetam a retenção, mobilidade e disponibilidade de metais pesados, estão o pH, CTC, matéria-orgânica, quantidade e tipo da fração argila (argilas silicatadas e óxidos), competição de outros metais pelos sítios de adsorção e quelação (McBRRIDE, 1994; ALLOWAY, 1995; FONTES et al., 2000; CETESB, 2001; GOMES et al., 2001; FONTES; GOMES, 2003).

O pH influi direta ou indiretamente, visto que é um dos atributos que mais afetam a distribuição química dos metais pesados e, consequentemente sua mobilidade e disponibilidade ao ambiente (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001). A maior parte da CTC do solo é devida à desprotonação de grupamentos ácidos da matéria orgânica e da superfície de minerais do tipo 1:1 e de óxidos de ferro e alumínio, apresentando valores crescentes com o aumento do pH (SPOSITO, 1989; PIERZYNSKI; SIMS; VANCE, 1994). Além disso, o comportamento químico de cada metal afeta na sua distribuição e, em geral, formas mais solúveis diminuem com aumento do pH. A CTC é indicativo potencial do solo na adsorção de metais pesados; entretanto, devem ser levados em consideração outros fatores como a seletividade do metal, concentração de outros cátions, pH e atividade iônica da solução (ROSS, 1994).

Os minerais de argila (principalmente a caulinita) possuem três planos morfológicos externos que expõem diferentes grupamentos funcionais OH de superfície, os quais são importantes sítios de adsorção para os metais pesados (SPOSITO, 1992; FONTES; WEED, 1996; FONTES et al., 2001). Além disso, os oxihidróxidos são componentes dos solos que

desempenham importante papel na imobilização dos metais pesados. Segundo Axe e Trivedi (2002), solos desenvolvidos em ambientes tropicais apresentam uma vantagem adicional na imobilização, atenuação e distribuição dos metais pesados por serem predominantes na fração argila óxidos e hidróxidos e também porque esses minerais possuem uma alta superfície específica ($> 400 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), presença de microporos e sítios de adsorção. Diante disso, os metais pesados podem ser adsorvidos eletrostaticamente na superfície dos óxidos ou podem ser adsorvidos especificamente, formando ligações parcialmente covalentes com os oxigênios da estrutura do mineral (McBRIDE, 1994).

Além dos oxihidróxidos, a matéria orgânica apresenta efeitos pronunciados nas reações químicas do solo e também participa ativamente na retenção e mobilidade do metal pesado pela presença, principalmente, dos grupamentos carboxílicos e fenólicos (SPARK et al., 1995). Esses grupamentos se distribuem de forma diferenciadas nos compostos humificados do solo, presentes em grande número na estrutura dos ácidos fúlvicos e húmicos sendo os maiores responsáveis pela capacidade adsorptiva da matéria orgânica. Os complexos metálicos formados com ácidos fúlvicos são, em geral, solúveis, enquanto os formados com ácidos húmicos são mais insolúveis (STEVENSON, 1999).

1.2.5 Qualidade ambiental do solo e metais pesados

Ao longo dos anos, em virtude da percepção dos desequilíbrios ambientais, o senso populacional a cada dia vem apresentando maior preocupação com a conservação da qualidade ambiental. Essa preocupação gerou a necessidade de utilização de alternativas de instrumentos de gestão ambiental com a finalidade de implantar o desenvolvimento sustentável (CAIRES, 2009). Dessa forma, estudos de metais pesados direcionados a proteção ambiental, procuram avaliar não somente a distribuição dos metais pesados oriundos de atividades humanas, mas também aqueles de origem natural para serem efetivos no discernimento das atividades contaminadoras. O desafio desses estudos surge com relação a separação dos efeitos antrópicos sobre os metais no solo, que pode ser feita mediante avaliação dos níveis naturais de metais pesados que caracterizem um solo considerado não contaminado, para posteriores inferências quanto à contaminação do solo.

Atualmente, pesquisas voltadas aos teores de metais pesados coletados em solos com nenhuma ou mínima perturbação antrópica, são informações importantes como subsídios para determinação e utilização dos valores de referência de qualidade do solo. Em países desenvolvidos, valores de referência de qualidade do solo com ênfase para os metais pesados já são bem estabelecidas e várias são as pesquisas que avaliam os teores naturais de metais pesados com subsídios para gestão ambiental (CHEN et al., 1991; HOLMGREN et al., 1993; BAK et al., 1997; CHEN et al., 1997; TOBIÁS; BECH; SANCHES ALGARRA, 1997; CHEN et al., 1999; PIERANGELI et al., 2001; HORCKMANS et al., 2005; MA et al., 1997; MARTINEZ et al., 2007; MARTÍNEZ et al., 2007; MARTINEZ-LLADÓ et al., 2008; RAWLINS et al., 2002; SU; YANG, 2008).

Segundo Martinez-Lladó et al. (2008) o valor de “background” é definido como a medida de tendência central da concentração dos elementos em questão, em solos sem intervenção antrópica, enquanto que valores de referência é a concentração extrema de certo elemento naturalmente encontrado nos solos. Para Rawlins et al. (2002), uma forma de estabelecer concentrações de base (background) de metais pesados em solos seria definir os limites superiores e inferiores usando valores de amostras analisadas de áreas sem abrangência de atividades humanas, mas que contemplem a diversidade geológica.

De acordo com Tobias, Bech e Sanches Algarra (1997), comparar os teores de metais pesados encontrados na literatura com os obtidos nas análises não é interessante devido as diferentes formas de apresentação, à diversidade de solos existentes, à variação dos fatores de formação, principalmente em função dos diferentes materiais de origem, bem como os diferentes métodos de extração. Estes autores utilizaram o quartil superior (75%) dos resultados analíticos para o estabelecimento dos valores de “background” e o percentil 95 para os valores de referência. Para o Estado de São Paulo também foi definido como base o quartil superior dos resultados analíticos (CETESB, 2001).

No Brasil, estes estudos ainda são incipientes, com apenas alguns Estados em conclusão e outros em andamento. Já existe uma resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2009), que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade dos solos quanto à presença de substância química, estabelecendo diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas devido ação antrópica.

A resolução estabelece que a avaliação da qualidade de solo, quanto à presença de substâncias químicas deve ser efetuada com base em “Valores Orientadores de Referência de Qualidade (VRQ), de Prevenção (VP) e de Investigação (VI)”. Os valores orientadores do solo para substâncias químicas presentes deverão ser estabelecidos para cada Estado, pelo

órgão ambiental competente, em até quatro anos após a publicação da resolução. Sendo assim, é imprescindível aos órgãos públicos ambientais conhecer o valor de referência de qualidade (background) dos metais pesados nos solos para definição dos “Valores Orientadores” e uma melhor gestão ambiental do recurso natural, solo.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. A.; ABREU, M.F.; BERTON, R.S. Análise química do solo para metais pesados. In: CURI, N.; MARQUES, J. ; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.; LOPES, A.S.S.; ALVAREZ V., V.H., (Ed). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2 p.645-692.

AGUIAR, M.R.M. P. de; NOVAES, A.C.; GUARINO, A.W.S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, p. 1145-1154, 2002.

ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.). **Heavy metals in soils**. New York. John Wiley, 1990. p. 339.

_____. **Heavy metal in soils**. 2nd ed. London: Blackie Academic, 1995. 368 p.

AXE, L.; TRIVEDI, P. Intraparticle surface diffusion of metal contaminants and their attenuation in microporous amorphous Al, Fe, and Mn oxides, **Journal Colloid Interface Science** v.247, p.259-265, 2002.

AZEVEDO, H.; PINTO, C.G.G.; SANTOS, C. Cadmium effects in sunflower: nutritional imbalances in plants and calluses. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 28, p. 2221-2231, 2005.

BAK, J.; JENSEN, J.; LARSEN, M.M.; PRITZL, G.; SCOTT-FORDSMAND. A heavy metal monitoring-programme in Denmark. **Science Total Environment**, 207: 179-186, 1997.

BOLAN, N.S.; NAIDU, R.; SYERS, J.K.; TILLMAN, R.W. Surface charge and solute interactions in soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 67. p. 87-140, 1999.

CAIRES, S.M. de. **Determinação dos teores naturais de metais pesados em solos do Estado de Minas Gerais como subsídio ao estabelecimento de valores de referência de qualidade**. 2009.321. Tese (Doutorado solos e nutrição de plantas) – Universidade federal de Viçosa, Viçosa. 2009.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos no solo. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B.van; ABREU, C.A. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq; FAPESP; POTAFOS, 2001. cap.5, p. 89-117.

CAMARGO, O.A.; BORBA, R.P.; ALLEONI, L.R.F. Metais pesados: da cosmogênese aos solos brasileiros. **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 29: CD-ROM. (Abstr.) 2003.

CHEN, J.; WEI, F.; ZHENG, C.; WU, Y.; ADRIANO, D.C. Background concentrations of elements in soils of China. **Water Air Soil Pollution**, v. 57, n. 5, p. 699-712, 1991.

CHEN, T. B.; WONG, J.W.C.; ZHOU, H.Y.; WONG, M.H. Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong. **Environmental Pollution**, v. 96, p. 61-68, 1997.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e água subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2001. 92 p. (Relatório Final. Série Documentos Ambientais).

_____. **Decisão de Diretoria nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências**. São Paulo, 2005, publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo de 03 de dezembro de 2005, retificada em 13 de dezembro de 2005. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf. Acesso em: 18 nov. 2009.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009.

COSTA, C.N.; MEURER, E.J.; BISSANI, C.A.; SELBACH, P.A. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: Meurer, E.J. **Fundamentos de Química do Solo**. 2ª ed. Porto Alegre: Gêneses. 2004. p. 239 – 282.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa. Solos/Embrapa Informática Agropecuária/Embrapa Comunicação para transferência de Tecnologia, 1999, 370p.

FADIGAS, F.S.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; MAZUR, N.; ANJOS, L.H.C. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, Campinas, v.61, n.2, p.151-159, 2002.

FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, v. 72, p. 37-52, 1996.

FONTES, M.P.F.; MATOS, A.T.; NEVES, J.C.L. Competitive adsorption of Zn, Cd, Cu and Pb in three highly weathered Brazilian soil. **Communications in soil science and plant analysis**, Athens, v. 31, p. 2939-2958, 2000.

FONTES; M.P.F.; CAMARGO; O.A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**. 2001.

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

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOOP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Soil Science Society of America. 2002. p.255-293. (Book Series n. 5).

GOMES, P.C.; FONTES, M.P.F.; SILVA, A.G.; MENDONCA, E.S.; NETTO, A.R. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1115-1121, 2001.

HOLMGREN, G.S.; MEYER, M.W.; CHANEY, R.L.; DANIELS, R.B. Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America. **Journal of Environmental Quality**, v. 22, p. 35- 348, 1993.

HORCKMANS, L.; SWENNEN, R.; DECKERS, J.; MAQUIL, R. Local background concentrations of trace elements in soils: a case study in the Grand Duchy of Luxembourg. **Catena**, v. 59, p. 279-304, 2005.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Soil constituents. In : KABATA-PENDIAS, A **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1984. p. 33-50.

_____. **Trace elements in soils and plants** – 3^a ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001. 315p.

MA, L.Q.; TAN, F.; HARRIS, W.G. Concentration and distributions of eleven metals in Florida soils. **Journal of Environmental Quality**, v.26, p. 769-775, 1997.

MACBRIDE. **Environmental chemistry if soils**. New York, Oxford Press, 1994, 406 p.

MARQUES, J.J.G.S.M., CURI, N., SCHULZE, D.G. Trace elements in Cerrado soils. In: ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 103-142.

MARTÍNEZ, J.; LLAMAS, J.; MIGUEL, E.; REY, J.; HIDALGO, M.C. Determination of the geochemical background in a metal mining site: example of the mining district of Linares (South Spain). **Journal of geochemical exploration**, v. 94, p. 19-29, 2007.

MARTINEZ-LLADÓ, X.; VILÀ, M.; MARTÍ, V.; ROVIRA, M.; DOMÈNECH, J.A.; PABLO, J. trace element distribution in topsoils in Catalonia: Background and reference values and relationship with regional geology. **Environmental engineering science**, v.25 p. 863-878, 2008.

MOREIRA-NODERMANN, L.M. A Geoquímica e o meio ambiente. **Geochimica Brasiliensis**, v.1, n.1, p.89-107, 1987.

NELLESSEN, J.E.; FLETCHER, J.S. Assesment of published literature on the uptake, accumulation, and translocation of heavy metals by vascular plants. **Chemosphere**, Oxford, v. 27, p.1669-1680, 1993.

OLIVEIRA, T.S. **Metais pesados como indicadores de materiais de origem de solos**. 1996. 128 p. Tese (Doutorado em Solos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

PARKER, D.R.; PEDLER, J.F. Reevaluating the free-ion activity model of trace availability to higher plants. **Plant and Soil**, v.196, p. 223-228, 1997.

EIJNENBURG, W.J.G.M.; JAGER, T. Monitoring approaches to assess bioaccessibility and bioavailability of metals: matrix issues. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.56, p.63-77, 2003.

PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; OLIVEIRA, L.R.; LIMA, J.M. Teor total e capacidade máxima de adsorção de chumbo em Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.5, p. 279-288, 2001.

PUNZ, W.F.; SIEGHARDT, H. The response of roots herbaceares plant species to heavy metals. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v.33, n.11, p.85-98, 1993.

RAMALHO, J.F.G.P.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X. Contaminação da microbacia de Caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1289-1303, 2000.

RAWLINS, B.G.; LISTER, T.R.; MACKENZIE, A.C. Trace-metal pollution of soils in northern England. **Environmental geology**, v.42 p.612-620, 2002.

ROVERS, H.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Níquel total e solúvel em DTPA em solos do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, n. 3, p. 217- 220, 1983.

SINGH, S.; SINHA, S. Scanning electron microscopic studies and growth response of the plants of *Helianthus annuus* L. grown on tannery sludge amended soil. **Environment International**, New York, v. 30, p. 389-395, 2004.

SOARES, M.R. **Coefficiente de distribuição (Kd) de metais pesados em solos do Estado de São Paulo**. 2004. 202 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

SPARK, K.M., WELLS, J.D., JOHNSON, B.B. Characterizing trace metal adsorption on kaolinite. **European journal of soil science**, v.46, p.633-640, 1995.

SPOSITO, G. The characterization of particles surface charge. In: BUFFLE, J.; van LEEUVEN, H.P. (eds.). **Environmental Particles**. Lewis Publishers, v.1. P. 291-314, 1992.

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

SU, Y.-Z.; YANG, R. Background concentrations of elements in surface soils and their changes as affected by agriculture use in the desert-oasis ecotone in the middle of Heihe River Basin, north-west China. **Journal of geochemical exploration**, v.98, p.57-64, 2008.

TAVARES, T.M.; CARVALHO, F.M. Avaliação da exposição de populações humanas à metais pesados no ambiente: exemplos no recôncavo baiano. **Química Nova**, São Paulo, v. 5, p. 147- 153, 1992.

TILLER, K.G. Heavy metals in soil and their environmental significance. **Advances in Soil Science**, New York, v.9, p.113-142, 1989.

TOBÍAS, F.J.; BECH, J.; SÁNCHEZ ALGARRA, P. Establishment of the background levels of some trace elements in soils of NE Spain with probability plots. **The Science of the total environment**, v.206, p.255-265, 1997.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Trace elements in human nutrition and health**. Geneva, 1996.

ZHANG, X.P.; DENG, W.; YANG, X.M. The background concentrations of 13 soil trace elements and their relationships to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet), China. **Journal of Asian Sciences**, Beijing, v.21, p.167-174, 2002.

VALADARES, J.M.A.S. Zinco em solos do Estado de São Paulo. I. Zinco total. **Bragantia**, Campinas, v.34, p.133-139, 1975.

CAPÍTULO 2

TEORES DE METAIS DISPONÍVEIS EM SOLOS DO ESTADO DO PARÁ

RESUMO: No contexto de preservação dos recursos naturais para promover o desenvolvimento sustentável, a disponibilidade dos metais pesados no solo constitui um dos atributos mais importantes para avaliação da potencial toxidez. O estudo objetivou determinar os teores disponíveis de metais pesados (Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni e Zn) nos solos representativos do Estado do Pará e correlacionar os metais com atributos dos solos. As coletas das amostras foram realizadas em solos representativos do Estado, em áreas com vegetação natural e/ou com mínima interferência antrópica. As amostras foram coletadas em duas profundidades, sendo 0-0,2 m e 0,8-1,0 m (Latossolo, Argissolo, Nitossolo e Plintossolo) e de 0-0,2 m e 0,4-0,6 m (Gleissolo, Cambissolo e Neossolo). Os teores disponíveis dos metais pesados foram obtidos por três métodos de extração Mehlich-I, Mehlich-III e DTPA. Os extratos analíticos do DTPA e Mehlich-III foram dosados por espectrometria de emissão óptica em plasma com acoplamento induzido e Mehlich-I determinado por espectrofotometria de absorção atômica. Foram feitas análises estatísticas descritivas e de correlação de Pearson entre metais, e entre os metais e os atributos do solo. Os teores disponíveis, bem como os valores de referências para os metais pesados nos solos do Estado do Pará, determinados pelos três extratores foram inferiores aos valores de referência estabelecidos pela CETESB e por solos de outras regiões do Brasil, corroborando a necessidade de um maior conhecimento das diversidades regionais para elaboração de normas nacionais. De acordo com os resultados, os teores disponíveis de metais nos solos do Pará seguiram a seguinte ordem, para Mehlich-I: $Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cr > Cd$; Mehlich-III: $Fe > Mn > Ba > Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > Cd$ e DTPA: $Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Ba > Ni > Cr > Cd$, independente da profundidade. Correlações significativas foram obtidas entre os metais e deste com a matéria orgânica, pH e CTC. O pH apresentou correlação negativa com Al nos três extratores. Os atributos CTC e MO apresentaram altas correlações nas duas profundidades. Não foi encontrada correlações entre a fração argila e a maioria dos elementos determinados, exceto o Zn na profundidade 2, quando extraído por DTPA. Teores disponíveis de metais determinados podem ser utilizados como base para definição de valores de referências e são considerados adequados para avaliação da disponibilidade desses elementos nos solos, de acordo com o preconizado pela legislação nacional.

Palavras chave: Elementos traços, valor de referência, território paraense

ABSTRACT: Facing the context of natural resources preservation to promote the sustainable development and considering the availability as one of the most important attribute to evaluate the toxicity potential of the soil's heavy metals. The study is concerned in determine the available contents of heavy metals (Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni and Zn) in the Para State representative soils and correlate the metals with soils attributes. The samples collection was realized in Para representative soils in areas with natural vegetation and/or with minimum anthropic interference. The samples were collected in two depths and they are: 0-0.2 m and 0.8-1.0 m (Ferralsol, Acrisol, Niosol and Plinthosol) and 0-0.2 m and 0.4-0.6 m (Gleysol, Cambisol and Arenosol). The available contents of the heavy metals were obtained for three method of extraction Mehlich-I, Mehlich-III and DTPA. The analytic extracts of the DTPA and Mehlich-III were dosed for spectrometry of optical emission in plasma with induced coupling and Mehlich-I determined by spectrophotometer of atomic absorption. Descriptive statistics and Pearson correlation analysis were made among metals, and among metals and soil attributes. The available contents, as the reference values for heavy metals in the Para State soils determined by the three extractors they were inferiors to the values of reference established by the CETESB, and soil from the other regions of the country, confirming the need for determining local backgrounds concentrations aiming at building national guidelines. The results showed that, the available metals concentrations followed the order, to Mehlich-I: Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cr > Cd; Mehlich-III: Fe > Mn > Ba > Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > Cd and DTPA: Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Ba > Ni > Cr > Cd, regardless of depth. Significant correlations were obtained between metals and with this organic matter, pH and CEC. The pH presented negative correlation with Al in the three extractors. The attributes CTC and MO presented high correlations on both depths. Between the clay fraction and the majority of the determined elements were not found correlations, except Zn depth 2, when extracted by DTPA. Available concentrations of certain metals may be used as a basis for defining reference values and are considered for assessing the availability of these metals in soils, according to the recommendations by national legislation.

Key-words: Trace elements, Reference value, Para Territory.

2.1. INTRODUÇÃO

A preservação da qualidade do meio ambiente é tema bastante discutido mundialmente. A poluição, de uma maneira geral, é um problema atual que requer uma abordagem adequada como consequência da atividade humana, transformando-se em grande problema ambiental, uma vez que interfere no ambiente da área afetada (solo, água, ar, fauna e vegetação). A preocupação com as consequências da poluição aos ecossistemas, principalmente, o solo, a água e o ar no Brasil, é recente.

A qualidade do solo, conceituada como a funcionalidade dos fatores químicos, físicos e biológicos que tornam o solo apto à produção vegetal, é também avaliada atualmente pela ausência de teores tóxicos de metais pesados. O solo, por se constituir um importante compartimento do ambiente vulnerável aos fatores ambientais e à ação antrópica, possui a capacidade de acumular muitos poluentes, apresentando grandes riscos de contaminação, uma vez que, seu poder “depurador” quando excedido, pode apresentar sérios riscos mediante a transferência de poluentes (MOREIRA- NORDEMAN, 1987).

Dentre esses poluentes, destacam-se os metais pesados por tratar de um grupo de elementos químicos responsáveis por causar impactos negativos aos ecossistemas e aos seres vivos. Por definição, esse termo é adotado para um grupo de metais e metalóides que estão associados com poluição e toxidez, incluindo neste termo, alguns elementos essenciais as plantas e animais e outros que não possuem nenhuma função biológica conhecida. Metal tóxico é um termo alternativo a metal pesado, porém é aplicado somente a elementos não essenciais, como Pb, Cd, Hg, As (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001) e não se aplica aos elementos essenciais, Cu, Mn e Zn (ALLOWAY, 1990).

A concentração total de um elemento no solo tem utilidade limitada, contudo é importante conhecê-la para se ter idéia do teor do elemento no ambiente. No entanto, se um elemento representar um perigo iminente de contaminação e poluição ambiental, é necessário conhecer em que forma ele se encontra no solo, uma vez que a mobilidade e a absorção pelas plantas e, conseqüentemente, a entrada na cadeia alimentar, irá depender dessas formas (CAMARGO et al., 2001).

Na solução do solo os metais podem ser encontrados como íons livres, complexos solúveis com ânions inorgânicos ou ligantes orgânicos. Já na fase sólida os metais podem ser encontrados na forma trocável, adsorvidos covalentemente a sítios específicos, complexados

por materiais orgânicos ou precipitados (COSTA et al., 2006). As principais formas disponíveis desses elementos são a solúvel, trocável e em algumas situações, as complexadas pela matéria orgânica.

Várias propriedades do solo afetam a forma em que o metal se encontra no solo e, conseqüentemente, sua disponibilidade e mobilidade. Dentre estes fatores podem-se citar o material de origem, o pH, a capacidade de troca de cátions (CTC), a matéria orgânica do solo (MOS), o potencial redox e a interação com outros elementos na solução do solo.

Reconhecer as reações que comandam o comportamento destes metais no solo e, principalmente, os processos que conduzem à sua solubilização e conseqüente disponibilidade são importantes para avaliar os impactos que estes metais podem provocar no meio ambiente (MATTIAZZO; ANDRADE, 2000).

Diante do contexto de preservação dos recursos naturais para promover o desenvolvimento sustentável, em muitos países desenvolvidos já existem estudos dos valores orientadores no qual designa a entrada máxima aceitável dos elementos químicos perigosos, dentre eles os metais pesados, de acordo com suas condições edafoclimáticas.

Um dos requisitos para a determinação destes valores é a obtenção da faixa de teores mínimos em amostras de solos em condições naturais coletadas em locais preservados, sem interferência antrópica. O seu conhecimento em condições naturais fornece indicativos do seu teor no ambiente, que é importante em estudos ambientais de contaminação e de poluição, principalmente no estabelecimento de padrões de referências. Os valores médios de concentração de metais pesados, no âmbito mundial, são bastante heterogêneos. Essas variações decorrem principalmente da diversidade de solos (FADIGAS et al., 2006) e dos diferentes métodos de extração e análise utilizados.

Os metais pesados estão diretamente ligados a gênese do solo, pois são componentes naturais dos minerais de solos oriundo das rochas, ocorrendo normalmente em baixas concentrações, não representando, em condições naturais, riscos para a humanidade e para vida animal (COSTA et al., 2004). No entanto, atividades antrópicas adicionam ao ambiente, materiais que contêm esses elementos, podendo alterar as concentrações naturais e prejudicar a funcionalidade do solo.

Em decorrência do aumento de áreas poluídas, a contaminação do solo por metais pesados tem chamado a atenção nos últimos anos. O que coloca em risco a sustentabilidade e a prática do desenvolvimento sustentável nos usos dos seus recursos naturais, dentre eles o solo. Neste sentido, valores de qualidade de metais pesados em solos são utilizados como referência no monitoramento ambiental dos mesmos diante das atividades com potencial de

contaminação (CETESB, 2001). Um solo pode ser considerado limpo quando a concentração de um elemento ou substância de interesse ambiental é menor ou igual ao valor de ocorrência natural. Esta concentração é denominada como valor de referência de qualidade.

Dessa forma tem-se a iniciativa no Estado do Pará, quanto á preocupação da qualidade de seus solos, diante da contaminação com metais pesados, a partir da determinação dos teores de metais disponíveis, em condições naturais, para definição dos valores de referência de qualidade.

O objetivo deste estudo foi determinar os teores disponíveis em condições naturais para os metais pesados (Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni e Zn) e correlacionar com atributos dos solos representativos do Estado do Pará.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Coletas das amostras

Os solos foram selecionados, primeiramente, pela representatividade e distribuição dentro do Estado do Pará, buscando compor um conjunto heterogêneo quanto aos atributos dos solos. Outro critério foi baseado na localização dos municípios de maior população do Estado, por apresentarem maior probabilidade de contaminação, além dos municípios com influência da extração mineral e de maior atividade agrícola e industrial (Tabela 2).

As concentrações naturais de metais foram obtidas pela análise de solos provenientes de áreas com o mínimo de interferência antrópica. Desta forma, foram selecionadas áreas com vegetação nativa ou reflorestada naturalmente com mais de 20 anos, para minimizar a possibilidade de escolha de um solo que tenha sofrido efeito antropogênico em um passado recente. Para identificação e seleção das áreas de coleta foram utilizadas informações do mapa de solos do Estado do Pará, junto ao IBGE.

As coletas das amostras de solos foram feitas dentro do domínio das classes de solos como demonstrado no mapa de amostragem (Figura 1). Coletou-se o solo com o trado Holandês fabricado em aço inox e bacias de plástico. A utilização do aço inox e do plástico visou evitar possíveis contaminações das amostras. Para cada tipo de solo, foram amostradas

áreas não superiores a 20 ha nas profundidades de 0-0,2 m e 0,8-1,0 m (Latossolo, Argissolo, Nitossolo e Plintossolo) e de 0-0,2 m e 0,4-0,6 m para (Gleissolo, Cambissolo e Neossolo).

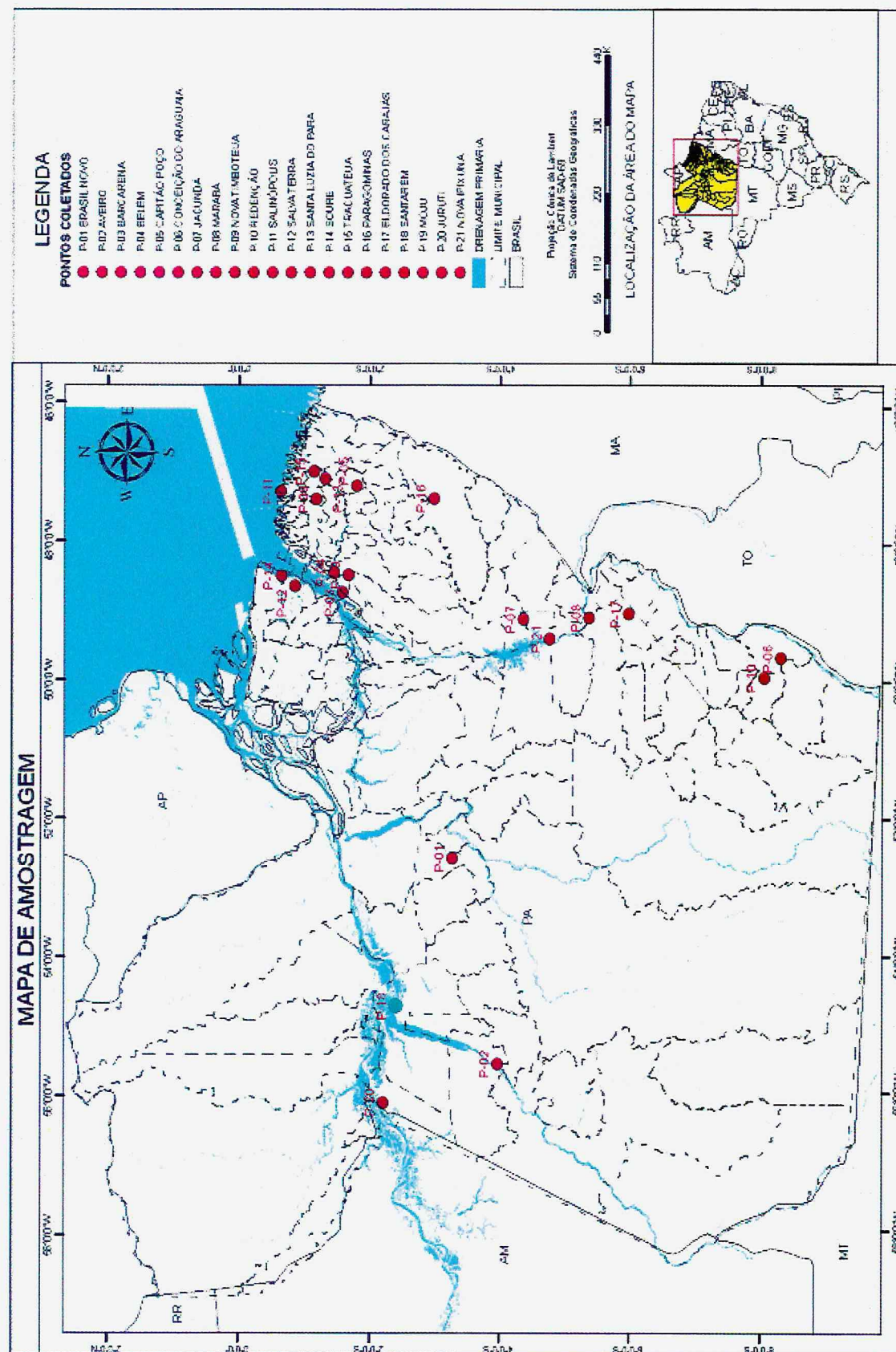


Figura 1: Localização das áreas de coletas de solos no Estado do Pará.

Foram amostradas, em cada local de coleta, dez amostras simples para formar uma amostra composta nas duas profundidades, perfazendo um total de três amostras compostas, para cada profundidade, obtendo a quantia de seis amostras para cada local de coleta.

Os pontos de coleta foram registrados com o GPS Garmin série etrex HC e georreferenciados ArcGIS versão 9.3 alocados no mapa de amostragem (Figura 1). As amostras de solos foram armazenadas em sacos plásticos e identificadas para o transporte até a Universidade Federal Rural da Amazônia onde foram preparadas e armazenadas para posteriores análises.

Os pontos de coleta distribuídos em razão das classes de solos amostrados encontram-se na Tabela 2. Foram georreferenciados 44 áreas de coletas, com um total de 264 amostras de solos. A maioria dos solos amostrados, pertence à classe dos Latossolos (52%), seguidos dos Argissolos (27%), Nitossolos (5%), Gleissolos (9%), Plintossolos, Neossolos e Cambissolos (2%).

Tabela 2: Distribuição total das áreas de coletas das classes de solos do Estado do Pará.

Ordem	Total de Pontos	%
Latossolos	23	52
Argissolos	12	27
Nitossolos	2	5
Gleissolos	4	9
Plintossolos	1	2
Neossolos	1	2
Cambissolos	1	2
Total	44	100

2.2.2 Preparação das amostras

As amostras, depois de acondicionadas em sacos plásticos, foram levadas para casa de secagem da UFRA, sendo espalhadas em bancadas cobertas por lonas até perderem a unidade. Após secagem, as amostras foram destorroadas e peneiradas em malhas de 2 mm feitas de aço inoxidável para se obter a terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras peneiradas foram armazenadas em potes plásticos devidamente identificados. Sub-amostras de solos foram separadas e submetidas às análises de fertilidade dos solos no Laboratório de Química

do Solo da ESALQ/USP. Da mesma forma, as sub-amostras de solos foram usadas na obtenção dos teores de metais e acondicionadas em pequenos potes plásticos, identificados e reservados para os procedimentos de análises.

2.2.3 Análises de Atributos Químicos

As análises químicas seguiram as recomendações de Raij et al. (2001) e físicas (granulometria) de acordo com Gee e Or (2002). Na TFSA foram determinados P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{+3} trocáveis, acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), pH em água, matéria orgânica e granulometria. De posse dos resultados obtidos das análises químicas foram calculadas a soma de bases trocáveis (SB), a capacidade de troca catiônica total (CTC) e as saturações por bases (V%) e Alumínio (m%).

2.2.4 Análises de Metais

Os teores disponíveis dos metais pesados foram obtidos por três métodos de extração: por DTPA a pH 7,3 (LINDSAY; NORVELL, 1978) adaptado por Abreu; Abreu e Andrade (2001); Mehlich-III (MEHLICH, 1984) e Mehlich I (MEHLICH, 1953).

Pelos extratores DTPA e Mehlich-III, a determinação dos metais (Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) foi realizada por espectrômetro de emissão óptica com plasma induzido acoplado (ICP-OES). Os teores disponíveis de metais extraído com Mehlich-I (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

DTPA

Para a realização do método DTPA, foram pesadas 10 g de solo e colocados em copos plásticos com capacidade de 115 mL. Adicionou-se 20 ml solução extratora DTPA

(ácido dietilenotriaminopentaacético na concentração de $0,005 \text{ mol L}^{-1}$) + trietanolamina (TEA $0,1 \text{ mol L}^{-1}$) + cloreto de cálcio ($\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $0,01 \text{ mol L}^{-1}$) a pH 7,3 com agitação por duas horas e depois filtradas em papel faixa azul durante uma noite. A solução obtida foi transferida para potes de polietileno e armazenadas para posterior leitura no espectrômetro de emissão óptica por plasma com acoplamento induzido.

Mehlich-III

Na execução do método Mehlich-III, 2,5 g de TFSA foram pesadas e colocadas em copos plásticos e adicionados 25 ml solução extratora Mehlich-III (20 g de nitrato amônio + 8 mL solução estoque + 11,5 mL de ácido acético + 0,8 mL de ácido nítrico, pH $\pm 2,5$). Em seguida, foram agitadas por cinco minutos e filtradas com uso de papel filtro faixa azul. O extrato obtido após filtragem foi transferido para potes de polietileno e armazenadas para posteriores leituras no espectrômetro de emissão óptica por plasma com acoplamento induzido.

Mehlich-I

Na execução do método Mehlich-I, 5,0 g foram pesadas colocadas em copos plásticos e adicionados 25 ml de solução extratora duplo-ácida (HCl $0,05 \text{ M}$ + H_2SO_4 $0,0125 \text{ M}$). Em seguida agitaram-se as amostras por cinco minutos e deixou-se decantar por uma noite. No dia seguinte, com auxílio de pipetas graduadas retirou-se o sobrenadante e transferiu o extrato para tubos de ensaios para posterior leitura no espectrofotômetro de absorção atômica em chama.

2.2.5 Análises estatísticas

Os dados foram organizados em planilhas no Microsoft Excel, e os resultados foram processados utilizando procedimentos da estatística descritiva e correlações de Pearson entre os metais, atributos do solo e os dados de levantamento. Os metais com valores abaixo do nível de detecção do ICP-OES foram excluídos das análises.

Utilizaram-se medidas de tendência central e medidas de variabilidade para os procedimentos descritivos enquanto que as correlações foram avaliadas aos níveis de 1 e 5% de probabilidade com utilização do programa estatístico SAEG versão 8.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Análises descritivas dos teores de metais

A ordem de abundância de metais em relação ao seu teor disponível médio extraído pelo método Mehlich-I na profundidade 1 (0-0,2 m) foi $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cd}$, e para a profundidade 2 (0,4-0,6 m e 0,8-1,0 m) houve inversão de ordem, entre o Cu e o Zn (Tabela 3). Valores médios de metais pesados próximos aos deste estudo foram encontrados por Bech et al. (2008) em solos da Espanha, que apresentaram a seguinte ordem de abundância: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd}$. Segundo Burak et al. (2008), em estudos geoquímicos em solos do Cerrado na região de Unaí, Paracatu e Vazante, em Minas Gerais, os metais Cu, Pb e Zn apresentaram um padrão de distribuição espacial de maior abundância próximo a suas fontes, devido a menor mobilidade desses metais em consequência da maior afinidade aos óxidos de Fe e Mn. Em geral, a afinidade dos metais pesados aos óxidos do solo segue a sequência: $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Co} > \text{Ni}$ (ROSS, 1994).

Os teores de Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn extraídos com Mehlich-I na profundidade 1, variaram de 0,0001- 0,443; 0,02- 40,79; 4,52- 551,8; 0,71- 243,58; 0,013- 8,9; 0,024- 7,37; 0,14- 34,21 mg kg^{-1} e na profundidade 2 de 0,002 - 0,47; 0,008- 32,1; 11,0- 566; 0,1- 200; 0,013- 7,5; 0,026- 10,0; 0,002- 32,6 mg kg^{-1} , respectivamente. Pereira et al. (2001) analisando amostras de horizontes superficiais (0-0,02 m) de solos representativos do Estado do Rio de Janeiro encontraram teores mínimos e máximos extraídos pelo Mehlich I para os elementos Cu, Fe, Mn e Zn (0,03-25,8; 4,47-436,22; 0,24-185,13; 0,14-12,69 mg kg^{-1} respectivamente).

Observou-se que os teores mínimos neste estudo foram próximos aos determinados por Pereira et al. (2001), porém os teores máximos neste trabalho foram maiores aos encontrados por esses mesmos autores, exceto para o Fe e Mn. Estes resultados refletem a necessidade de estudos regionalizados para a determinação dos valores naturais de metais em solos.

Tabela 3 - Análise descritiva dos teores disponíveis de metais pesados nas profundidades 1 e 2, em amostras de solos do Estado do Pará, extraídos por Mehlich-I.

	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----						
	<u>Profundidade 1^w</u>						
	110 ¹	126	132	132	67	124	131
Média	0,067	3,23	297,45	51,23	1,34	2,13	4,12
Mediana	0,043	0,86	304,3	21,58	0,47	1,98	1,45
Intervalo de confiança	0,012	0,88	21,64	9,72	0,4	0,2	0,9
Mínimo	0,0001	0,02	4,52	0,71	0,013	0,024	0,14
Máximo	0,443	40,79	551,8	243,58	8,9	7,37	34,21
Desvio Padrão	0,079	5,99	151,17	67,92	2	1,36	6,26
CV	119	185	51	133	149	64	152
VR ^Q	0,063	< 4	-	-	< 1,0	3,09	4,51
VR ^a	≤5	35	-	-	13	17	60
VP ^b	1,3	60	-	-	30	72	300
VI ^c	3	200	-	-	70	180	450
	<u>Profundidade 2^z</u>						
	103 ¹	125	132	132	49	125	115
Média	0,063	2,82	206,1	21,7	1,10	2,17	2,66
Mediana	0,042	1,21	135,3	5,5	0,32	2,13	0,66
Intervalo de confiança	0,013	0,8025	23,2	5,9	0,42	0,19	0,82
Mínimo	0,002	0,008	11,0	0,1	0,013	0,026	0,002
Máximo	0,47	32,1	566	200	7,5	10,0	32,6
Desvio Padrão	0,079	5,45	162,2	41,0	1,80	1,32	5,33
CV	127	194	79	189	164	61	201
VR ^Q	< 0,06	2,5	-	-	0,7	3	3

¹ Número de amostras analisadas

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.

^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0 m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6 m.

^Q Valor de referência estabelecido neste trabalho.

^a Valores de referência; ^b Valores de prevenção; ^c valores de intervenção, segundo CETESB (2005).

Os valores medianos da maioria dos elementos na profundidade 1 (0-0,2 m) (exceto Fe) e de todos elementos na profundidade 2 (0,4-0,6 m e 0,8-1,0 m) mostraram-se inferiores aos valores médios, indicando que a maioria desses valores se distribuem assimetricamente, concentrando-se na parte superior. O Cu na profundidade 1 (0-0,2 m) foi o elemento que mais variou em relação a sua distribuição (0,02 a 40 mg kg⁻¹), com teor médio de 3,23 mg kg⁻¹. Elementos como Ni e Zn mostraram coeficientes de variação semelhantes, porém alto, e o Fe foi o elemento que menos variou em relação a sua distribuição nos solos. Na profundidade 2 (0,4-0,6 m e 0,8-1,0 m), o Zn foi o elemento que mais variou (0,002 a 32,6 mg kg⁻¹), com teor médio de 2,66 mg kg⁻¹. O Pb seguido de Fe, foram os elementos que menos variaram, na profundidade 2, em relação a sua distribuição nos solos, com coeficientes de variação de 61 e 79 %, respectivamente. Milagres et al. (2007) analisando 36 amostras de solos dos Estados de Minas gerais e Bahia na camada superficial (0-0,2 m) pelo extrator Mehlich I, também encontraram uma ampla variação nos teores de Fe, Zn, Cu e Mn de (66-1520; 0,0-32,0; 0,0-13,5 e 0,0-366 mg dm⁻³), respectivamente. Observou-se que os teores mínimos e máximos determinados por Milagres et al. (2007) são próximos aos desta pesquisa, exceto os teores máximos de Cu que são inferiores.

Nos solos do Estado do Pará, o conhecimento dos teores naturais disponíveis de Mn e Fe, apesar de esses elementos não serem diretamente referenciados em legislações ambientais, é importante, pois além de tratar da disponibilidade dos micronutrientes as plantas, a presença destes elementos como constituintes principais de rochas são importantes no estudo da geoquímica dos solos, inclusive indicando, de forma indireta, os teores de outros metais.

Foram observados teores médios disponíveis de Fe elevados, tanto na profundidade 1 (297,45 mg kg⁻¹) quanto na profundidade 2 (206,1 mg kg⁻¹). Este acúmulo resulta da formação de óxidos em maiores teores no Estado do Pará de intemperismo mais intenso do que em outros Estados e corroboram com os teores encontrados por Pereira et al. (2001) para solos do Rio de Janeiro e por Valladares et al. (2009) para solos do Estado de São Paulo. Oliveira e Nascimento (2006), trabalhando com solos de referência de Pernambuco, encontraram em Petrolina teor máximo de 3072,1 mg dm⁻³ na camada superficial e 971,7 mg dm⁻³ na camada subsuperficial. Em solos de referência do Sertão de Pernambuco, foram obtidos valores superiores a 7000 mg dm⁻³ de Fe na camada superficial e superiores a 6000 mg dm⁻³ na camada subsuperficial. Esse resultado é esperado, em decorrência deste elemento ser constituinte estrutural dos óxidos. Esses mesmos autores também encontraram teores médios de Fe extraído por mehlich I nas regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão de 55,8 mg kg⁻¹ e

51,5 mg kg⁻¹, respectivamente. Kabata Pendias e Pendias (2001), relatam que o conteúdo de Fe nos solos é herdado das rochas de origem, como resultado de processos que ocorrem no solo. Saldanha et al. (1997) analisando 15 perfis de solo distribuídos por diversas regiões do Brasil, observaram teores médios de Fe variando entre 5,6 e 138,5 g kg⁻¹. Burt et al. (2003) analisando solos de referência coletados em toda extensão territorial dos EUA, encontraram uma grande amplitude de Fe com valores situados entre 0,003 e 227 g kg⁻¹. Estes teores são bem maiores aos teores de Fe encontrados neste trabalho e reflete a grande diversidade de materiais de origem que compõem estes solos.

Os teores disponíveis de Mn no referido trabalho foram elevados de 51,23 e 21,7 mg kg⁻¹, na camada superficial e sub-superficial, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira e Nascimento (2006), que encontraram teores médios na ordem de 50,4 mg kg⁻¹ na camada superficial e 24,5 mg kg⁻¹ na camada subsuperficial. No entanto, esses valores são baixos quando comparados aos reportados por outros pesquisadores brasileiros, para os quais são comuns valores superiores para grande parte dos solos (CAIRES, 2009; BURAK, 2008). Burt et al. (2003), comparando teores de Mn em solos com e sem atividade humana, não encontraram diferença no teor deste elemento em função da ação antrópica, considerando-se este fato devido à relativa abundância e intensa dinâmica deste elemento, que possui diversos estados de oxidação no solo e cuja especiação é dependente do pH e potencial de oxi-redução. Estas considerações podem explicar a inexistência de valores orientadores destes metais em solos definidos por órgãos ambientais e podem ser estendidas para o Fe, devido às similaridades entre esses elementos.

Os teores dos metais pesados na maioria dos solos deste estudo (Tabela 3) foram considerados baixos em comparação a solos de outras regiões do Brasil, no entanto, os teores situaram-se em uma ampla faixa de variação. Por Exemplo, Campos et al. (2003) em estudo com 19 Latossolos, de diferentes regiões do Brasil e desenvolvidos a partir de várias matérias de origem observaram teores médios de Cd 0,66 mg kg⁻¹, Cu variando entre 3 e 238 mg kg⁻¹, e Ni variando entre 3 e 45 mg kg⁻¹, onde os maiores teores de metais foram observados nos solos derivados de rochas máficas. Caires (2009) para solos de Minas Gerais encontraram teores mais elevados de Cd, Cu, Ni na ordem dos Latossolos, com médias de 0,2; 74,70; 46,65 mg kg⁻¹. Em solos do Cerrado, Marques et al. (2002) observaram teores médios iguais, em mg kg⁻¹, a 0,5 (± 0,4); 1,5 (± 1,7); 21 (± 28); e 95 (± 38) para Zn, Cu, Mn e Fe respectivamente. Considerando os solos deste estudo extraídos por Mehlich I, os teores de Cu, Zn, Mn e Fe, são superiores aos relatados por Marques et al. (2002).

Entre os solos estudados foram observados teores médios disponíveis de Cd e Ni, nas duas profundidades e Cu na profundidade 2 mais altos do que os valores de referência de qualidade estabelecido neste trabalho, porém todos os metais Cd, Cu, Ni, Pb e Zn aprestaram valores inferiores aos VRQ e Valores de Prevenção estipulado pela CETESB (2005). Diversos métodos de extração são empregados na quantificação dos teores disponíveis de metais pesados no solo, porém, muitas vezes, os valores encontrados variam amplamente entre os extratores. A variação da quantidade extraída deve-se às diferentes maneiras de atuação dos diferentes extratores e às características do solo que afetam a disponibilidade dos metais. Nascimento et al. (2002). O maior poder de extração de solução diluída de ácidos fortes, como o Mehlich-I, foi atribuído à dissolução de metais em formas trocáveis da fase sólida, da solução e parte dos complexados, o que torna esse método relevante na avaliação da disponibilidade de metais pesados em solos (ABREU et al., 2002).

Os valores médios disponíveis dos metais determinados pelo extrator Mehlich-III foram superiores na profundidade 2 (0,4-0,6 m e 0,8-1,0 m) em relação a profundidade 1 (0-0,2 m), exceto os teores de Cr e Fe (Tabela 4). Os teores médios obtidos nesse estudo foram superiores aos teores médios dos elementos Cu, Fe, Mn e Zn (0,82; 104,81; 15,70; 1,15 mg kg⁻¹) extraídos com o mesmo extrator em solos naturais da Espanha por Cancela et al. (2002). Os teores foram próximos aos valores encontrados por Marques et al. (2004) em estudos com metais pesados em solos do cerrado, para os elementos Pb, Zn, Cu e Ni (1,55; 1,73; 0,94; 1,58 mg kg⁻¹) respectivamente. Esses resultados são explicados devido às soluções ácidas extraírem quantidades próximas do teor total, devido ao seu potencial em dissolver certas estruturas que retém metais no solo (ABREU et al., 1995).

A variação nos teores de Cu, Fe, Mn e Zn (0,0029-21,6; 8,87-2265; 0,0012-732; 0,011-22,94 mg kg⁻¹, respectivamente) na profundidade 1 (0-0,2 m) encontrada neste estudo foi superior aos obtidos por Cancela et al. (2002) em solos naturais da Espanha. De acordo com Oliveira e Nascimento (2006), trabalhando com solos de referência de Pernambuco, os maiores teores disponíveis de Mn e Fe foram extraídos por Mehlich III com médias de 24,5 mg kg⁻¹ nas camadas superficiais e 72,8 mg kg⁻¹ na camada subsuperficial para o Mn e 163,4; 142,6 mg kg⁻¹ para o Fe, respectivamente. Esta maior recuperação para esses elementos pode estar relacionada com a presença de EDTA no extrator Mehlich III e a sua capacidade de dissolução de óxido de ferro, fração responsável por grande parte da quantidade retida de ambos elementos.

O Cd foi o metal que apresentou menor variação, nas duas profundidades de coletas, cujo valor de referência foi menor que 0,05 mg kg⁻¹. Esse teor está próximo ao proposto pela

Cetesb (2005) para os solos do Estado de São Paulo, como valor de referência de qualidade para os solos, bem como daqueles estabelecidos por com Martinez-Lladó et al. (2008) para os solos da Catalonia – Espanha. Comportamento oposto ao do Cd, verificou-se nos elementos Mn e Ba, que mostraram grande variação em ambas profundidades.

Tabela 4 - Análises descritivas dos teores disponíveis de metais pesados nas profundidades 1 e 2 em amostras de solos do Estado do Pará, extraídos por Mehlich-III.

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----								
	Profundidade 1 ^w								
	127 ⁱ	63	127	113	127	113	40	118	114
Média	2,89	0,040	0,50	1,53	296	42,11	1,02	0,48	1,69
Mediana	0,25	0,027	0,11	0,26	103,72	2,22	0,50	0,14	0,42
Intervalo de confiança	1,09	0,009	0,13	0,55	57,96	18,02	0,34	0,12	0,59
Mínimo	0,011	0,001	0,0003	0,0029	8,87	0,0012	0,0025	0,0001	0,011
Máximo	49,62	0,26	4,39	21,61	2265	732	4,85	4,28	22,94
Desvio Padrão	7,50	0,042	0,88	3,55	397,11	116,43	1,30	0,80	3,80
CV	259	103	175	232	134	277	128	165	224
VR ^Q	1,5	< 0,05	0,6	1,7	-	-	1,2	0,6	1,2
VR ^a	75	≤ 5	40	35	-	-	13	17	60
VP ^b	150	1,3	75	60	-	-	30	72	300
VI ^c	300	3	150	200	-	-	70	180	450
	Profundidade 2 ^z								
	130 ⁱ	64	126	111	127	107	43	118	115
Média	4,04	0,045	0,47	1,54	262,86	61,06	1,20	0,54	1,88
Mediana	0,34	0,029	0,19	0,37	132,65	1,74	0,22	0,18	0,47
Intervalo de confiança	1,71	0,0088	0,099	0,63	44,61	29,55	0,48	0,12	0,53
Mínimo	0,010	0,013	0,0019	0,0003	4,6	0,0031	0,0065	0,0012	0,0044
Máximo	60,99	0,24	4,12	28,13	1393	959	7,94	3,54	16,74
Desvio Padrão	11,86	0,043	0,68	4,06	306	186	1,91	0,78	3,47
CV	294	96	143	263	116	304	159	145	185
VR ^Q	1,2	< 0,05	0,6	1,6	-	-	1,9	0,5	1,4

ⁱ Número de amostras analisadas

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.

^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

^Q Valor de referência estabelecido neste trabalho.

^a Valores de referência; ^b Valores de prevenção; ^c valores de intervenção, segundo CETESB (2005).

Os teores disponíveis de Ba foram variáveis nos solos do Estado do Pará extraído por Mehlich III, com médias de 2,89 mg kg⁻¹ na profundidade 1 (0-0,2 m) e 4,04 mg kg⁻¹ na profundidade 2 (0,4-0,6 m e 0,8-1,0 m) e amplitude de 0,011-49,62 e 0,010-60,99 mg kg⁻¹ respectivamente, nas duas profundidades de coletas. Pérez et al.(1997) em estudo com dois horizontes de 15 solos, distribuídos nas cinco regiões do Brasil, analisaram Ba e encontraram teores variando de 0,09-201,4 mg kg⁻¹ e média de 47,65 mg kg⁻¹, apresentando valores superiores aos encontrados nesta pesquisa. Marques et al. (2004), avaliando solos do Cerrado,

formados sob diferentes materiais de origem, observaram valores de Ba 33 ± 38 ; 41 ± 49 e $299 \pm 226 \text{ mg kg}^{-1}$ (média $\pm$ desvio) em solos derivados de rocha sedimentar, basalto, e gnaiss, respectivamente. Observa-se, entretanto, que o conjunto de amostras de solos do Estado do Pará desta pesquisa, contém predominantemente Latossolos e Argissolos, condição que possibilitou uma tendência a valores mais baixos. Kabata-Pendias e Pendias (2001) reportam teores médios de Ba em solos do mundo variando de 20-3000 mg kg^{-1} .

Nos solos do Estado do Pará, os teores disponíveis de Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn extraídos por Mehlich III, foram inferiores aos valores de referência de qualidade, prevenção e investigação estabelecidos pela CETESB (Tabela 4). Importante observar que, os elementos Ba e Zn neste estudo, apresentaram teores médios disponíveis superiores aos valores de referência de qualidade determinados neste trabalho (1,5 e 1,2 mg kg^{-1} de Ba e 1,2 e 1,4 mg kg^{-1} de Zn) nas duas profundidades, respectivamente. Estes resultados corroboram a necessidade de estudos visando à obtenção de dados regionalizados para a definição de teores disponíveis de metais com a finalidade de orientação de qualidade.

O DTPA é o extrator mais utilizado na determinação dos teores disponíveis de metais pesados nos solos do Brasil, embora tenha sido desenvolvido para solos de regiões temperadas. O Estado de São Paulo tem adotado como método de referência e o seu uso na avaliação da biodisponibilidade dos metais de ocorrência natural tem sido eficiente (BATALIA; RAIJ, 1989; FERREIRA; CRUZ, 1992).

Os teores de Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn extraídos com DTPA na profundidade 1, variaram de 0,004-3,89; 0,0001-0,11; 0,0002-0,31; 0,011-7,45; 2,69-261; 0,066-85; 0,0003-2,20; 0,029-1,36; 0,0018-7,97 mg kg^{-1} respectivamente, sendo observada uma grande variação de amplitude entre os metais determinados (Tabela 5). A amplitude observada pode ser explicada pela grande extensão de área amostrada, onde há influência de diferentes materiais de origens que compõem os solos do Estado do Pará.

O teor de Ba, seguido de Cu e Zn (0,0041-3,89; 0,011-7,45 e 0,0018-7,97 mg kg^{-1}) respectivamente, na profundidade 1, foram os que mais variaram em relação a sua disponibilidade nos solos, ao contrário de Fe e Pb (2,69-261 e 0,029-1,36 mg kg^{-1}) que apresentaram a menor variação. Na profundidade 2, o Cr seguido de Mn (0,0003-0,48; 0,0026-266 mg kg^{-1}) foram os elementos que mais variaram em relação a sua disponibilidade, enquanto que o Pb foi o elemento que menos variou. Por outro lado, Pierangeli et al. (2001) encontraram uma maior variação nos teores de Pb nos solos da região Sul e Sudeste que os solos da região Norte e Nordeste, utilizando amostras superficiais de Latossolos não contaminadas (0-0,2 m). Segundo Alloway et al. (1990), o teor de Pb em solos não

contaminados, varia muito dependendo do material de origem. Cancela et al. (2002) utilizando o mesmo extrator na avaliação de teores de metais em solos, sob condições naturais, na região da Espanha encontraram também uma grande variação dos teores de Cu, Fe, Mn e Zn (0,03-1,74; 3,85-356,73; 0,06-241,11; <0,01-6,40 mg kg⁻¹). Neste trabalho foram observados teores mínimos de Cu e Zn menores e teores máximos mais elevados, enquanto que para o Fe e o Mn, aqueles autores observaram teores máximos maiores.

Os teores médios de todos os metais determinados pelo DTPA na profundidade 1 foram maiores que os da profundidade 2, indicando, em média, um acúmulo preferencial desses metais em superfície. Foram encontrados altos teores disponíveis de Ba, Cd, Cu, Pb e Zn (0,20; 0,90; 0,32 e 0,93 mg kg⁻¹) o que se deve ao alto grau de intemperismo dos solos representativos do Estado do Pará (Latossolos e Argissolos), que apresentam valores de pH muito ácidos, favorecendo a disponibilidade dos metais. Os teores médios de Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn deste estudo foram inferiores aos encontrados por Marques et al. (2004), em solos do Estado de Minas Gerais, o que pode ser justificado pela maior variabilidade e a formação sedimentar da maioria dos solos estudados neste trabalho.

Os teores médios de Cu, Fe e Mn nas profundidades 1 e 2 foram respectivamente: 0,90 mg kg⁻¹, 0,52 mg kg⁻¹; 86 mg kg⁻¹, 35,21 mg kg⁻¹ e 0,95 mg kg⁻¹, 5,56 mg kg⁻¹. Cancela et al. (2002) encontrou teor médio de Cu (0,59 mg kg⁻¹) superior, de ferro semelhante (74,30 mg kg⁻¹) e de Mn inferior (24,61 mg kg⁻¹) aos encontrados neste estudo. Os teores médios do Zn na profundidade 1 (0,93 mg kg⁻¹) estão próximos ao encontrado por Cancela et al. (2002), em solos da Espanha e inferiores aos encontrados por Abreu et al. (2005), em solos de São Paulo. Os valores máximos encontrados estão bastante baixo dos níveis tóxicos para saúde humana de 130 mg kg⁻¹, segundo Alloway (1995).

Oliveira e Nascimento (2006) estudando formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco também encontraram teores médios de Fe e Mn de 95,8 e 44,4 mg kg⁻¹, na camada superficial, e 75,1 e 28,6 mg kg⁻¹, na camada subsuperficial, respectivamente, para o extrator DTPA. Abreu et al. (1994) estudando a eficiência de diferentes extratores em solo com pH 5,5, observaram uma menor extração de Mn pelo DTPA, em relação aos extratores ácidos. De acordo com os autores, tal efeito é devido ao maior valor de pH do extrato obtido pelo DTPA (pH 7,3), o qual pode resultar em precipitação do Mn, diminuindo, dessa forma, os teores extraídos do solo. Vários autores observaram que o Mehlich I e Mehlich III proporcionaram uma extração e quantidades mais elevadas de metais do que o DTPA em solos do Brasil (NASCIMENTO et al., 2002). As diferenças na extração são devido à composição química de diferente dos extratores, no caso do DTPA, depende da

formação de complexos solúveis em água que diminuem as atividades de micronutrientes livres em solução, como consequência, a fase libera micronutrientes para manter o equilíbrio entre o solo e a fase de solução.

Tabela 5 - Análises descritivas dos teores disponíveis de metais pesados nas profundidades 1 e 2, em amostras de solos do Estado do Pará, extraídos por DTPA.

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
-----mg kg ⁻¹ -----									
	Profundidade 1 ^w								
	120 ¹	126	123	132	132	132	116	132	132
Média	0,20	0,0091	0,032	0,90	86	7,95	0,19	0,32	0,93
Mediana	0,086	0,0058	0,018	0,26	82	2,16	0,048	0,24	0,23
Intervalo de confiança	0,062	0,0024	0,0068	0,22	8,26	2,40	0,063	0,037	0,22
Mínimo	0,0041	0,0001	0,0002	0,011	2,69	0,066	0,0003	0,029	0,0018
Máximo	3,89	0,11	0,31	7,45	261	85	2,20	1,36	7,97
Desvio Padrão	0,41	0,017	0,046	1,54	57,68	16,79	0,41	0,26	1,53
CV	211	182	143	171	67	211	222	80	164
VR ^Q	0,17	0,0078	0,036	0,85	-	-	0,13	0,41	0,78
VR ^a	75	≤5	40	35	-	-	13	17	60
VP ^b	150	1,3	75	60	-	-	30	72	300
VI ^c	300	3	150	200	-	-	70	180	450
	Profundidade 2 ^z								
	123 ¹	129	121	132	132	129	100	132	111
Média	0,15	0,0072	0,021	0,52	35,21	5,56	0,20	0,27	0,46
Mediana	0,049	0,0040	0,0067	0,16	9,58	0,29	0,011	0,15	0,11
Intervalo de confiança	0,034	0,0019	0,011	0,16	8,37	2,29	0,067	0,044	0,13
Mínimo	0,0030	0,0002	0,0003	0,0050	0,0026	0,022	0,0001	0,0040	0,0025
Máximo	1,25	0,085	0,48	7,90	266	80	1,49	1,70	5,66
Desvio Padrão	0,23	0,013	0,074	1,13	58	15,84	0,40	0,31	0,86
CV	150	184	352	216	166	285	203	116	187
VR ^Q	0,2	0,006	0,01	0,4	-	-	0,1	0,3	0,6

¹ Número de amostras analisadas

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.

^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

^Q Valor de referência estabelecido neste trabalho.

^a Valores de referência; ^b Valores de prevenção; ^c valores de intervenção, segundo CETESB (2005).

Os teores médios do Pb extraído pelo DTPA, de $0,32 \text{ mg kg}^{-1}$ na profundidade 1 e de $0,27 \text{ mg kg}^{-1}$ na profundidade 2, estão abaixo daqueles encontrados por Burak (2008) de 1,7 e $1,29 \text{ mg kg}^{-1}$ em duas profundidades (0-0,2 e 0,6-0,8 m respectivamente) em solos de Minas Gerais. Teores mais elevados foram obtidos por Abreu et al. (2005), de $0,85 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb, para a camada de 0-0,2 m de Latossolos e Argissolos desenvolvidos sobre diferentes materiais geológicos dentro do Estado de São Paulo, sob vegetação natural. O teor médio de Pb do presente estudo é também menor que o valor máximo de $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$ encontrado por Cancela et al. (2002) em horizontes diagnósticos de solos não antropizados e representativos do Estado de São Paulo. Segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001) o Pb é o metal que apresenta, no solo, a maior afinidade por compostos orgânicos. O DTPA, por atuar como agente complexante, pode competir pelo Pb com os compostos orgânicos do solo, extraíndo, em razão desse comportamento, maiores teores desse elemento do solo.

Foi observado teor médio de Cd superior na profundidade 1 (média de $0,0094 \text{ mg kg}^{-1}$) que na profundidade 2 (média de $0,0072 \text{ mg kg}^{-1}$). Os teores médios de Cd determinados neste estudo são inferiores aos reportados por Caires (2009), que apesar de indicar valores superiores a $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$ possuem 70% de seus dados com valor inferior a $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$. Nos solos do mundo, a concentração média de Cd varia de $0,06$ - $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$. Chen e Ma (1998), analisando amostras de solos do Estado da Flórida, verificaram teor médio de Cd de $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$, valor este que mais se aproxima aos encontrados nos solos do Estado do Pará extraído por DTPA.

Nas amostras de solos estudadas foram observados teores médios disponíveis de Ba, Cd, Cr, Cu, Ni e Zn na profundidade 1 e teores médios de Cd, Cu e Ni na profundidade 2 mais altos que os valores de referência de qualidade determinados neste estudo. Por outro lado, todos os solos apresentaram teores disponíveis muito abaixo aos valores de referências de qualidade, prevenção e investigação indicados pela Cetesb (2009).

2.3.2 Correlações entre os metais pesados

Na profundidade 1, entre os metais pesados, ocorreram correlações positivas do elemento Cd com Mn, Ni, Pb e Zn e na profundidade 2 o Cd também se correlacionou com esses metais exceto o Pb. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Chen et al. (1999)

e Ma et al. (1997), pois esses autores encontraram correlações significativas entre todos os metais pesados. Correlação significativa entre Cd e Mn foi encontrado por Sterckeman et al. (2006) em solos da França. Segundo Sterckeman et al. (2006) a adição de óxido de Mn hidratado reduz a extratibilidade e fitodisponibilidade de Cd em solos alcalinos muito mais do que adição de óxidos de ferro. Este resultado sugere que o Cd em solos de materiais sedimentares encontra-se especificamente ligado aos óxidos de Mn, porém a instabilidade das diferentes formas de Mn no solo é altamente dependente das reações de oxirredução, que podem ter um efeito na dinâmica do Cd no solo.

O elemento Cu teve correlação com Mn, Ni e Zn na profundidade 1 e apenas com Mn na profundidade 2. Correlações positivas foram observadas entre os elementos Ni e Fe, Cd e Mn ($p < 0,01$) na profundidade 2, além do que o Ni apresentou as maiores correlações positivas com Zn ($r = 0,74$, $p < 0,01$), Cu ($r = 0,71$, $p < 0,01$) e Mn ($r = 0,70$, $p < 0,01$) na profundidade 1 e apenas com Zn ($r = 0,95$, $p < 0,01$) na profundidade 2.

Tabela 6 - Coeficiente de correlação entre metais pesados das amostras nas profundidades 1 e 2 nos solos do Estado do Pará, utilizando o extrator Mehlich-I.

	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
<u>Profundidade 1^w</u>							
	110 ¹	126	132	132	67	124	131
Cd	1						
Cu	0,19	1					
Fe	0,18	-0,10	1				
Mn	0,55**	0,51**	-0,31*	1			
Ni	0,42**	0,71**	0,05	0,70**	1		
Pb	0,30*	0,02	-0,003	-0,03	0,11	1	
Zn	0,53**	0,30*	0,19	0,68**	0,74**	0,03	1
<u>Profundidade 2^z</u>							
	103 ¹	125	132	132	49	125	115
Cd	1						
Cu	0,11	1					
Fe	0,48**	-0,12	1				
Mn	0,68**	0,40**	0,12	1			
Ni	0,63**	0,20	0,56**	0,47**	1		
Pb	0,12	-0,01	0,02	-0,02	0,10	1	
Zn	0,58**	0,14	0,42**	0,49**	0,95**	0,11	1

¹ Número de amostras analisadas

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.

^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

** Correlação significativa a 0,01; * Correlação significativa a 0,05.

Do total de 132 amostras, Ni e Cd foram os elementos que tiveram o menor número de leituras no ICP-OES quando extraídos pelo Mehlich-III (Tabela 7).

Nas profundidades 1 e 2 houve correlação do Ba com todos os elementos, exceto com Cr, sendo que a correlação mais alta foi com Cd ($r=0,68$; $r=0,82$, $p<0,01$). Houve também correlação de Cd com o Fe ($r=0,70$; $r=0,62$). De acordo com Foster (1991), pela classificação geoquímica dos elementos, o Fe é um elemento siderófilo, mas possui afinidade com elementos calcófilos e litófilos. Portanto, a afinidade secundária do elemento Fe explica a alta afinidade deste com o Cd, visto ser este pertencente ao grupo calcófilo.

O Ni, na profundidade 1, apresentou correlações com Zn ($r=0,95$, $p<0,01$), Fe ($r=0,83$, $p<0,01$) e Cr ($r=0,80$, $p<0,01$) este resultado é consistente com os dados publicados por Tume et al. (2006) e por Bech et al. (2005) em solos naturais na Catalonia (Espanha). A correlação entre Fe e Ni se explica em função de que estes dois elementos são classificados geoquimicamente como siderófilos, sugerindo uma interação maior do elemento Fe com os metais (FONTES; WEED, 1991; ALLOWAY, 1990; OLIVEIRA et al., 2000), que citam a importância dos óxidos de ferro, em solos de clima tropical, como controladores da mobilidade de metais pesados.

Altas correlações na profundidade 1 foram observadas entre os elementos Fe e Zn ($r=0,82$, $p<0,01$), Fe e Ni ($r=0,83$, $p<0,01$), Fe e Cd ($r=0,70$, $p<0,01$), Ba e Cd ($r=0,68$, $p<0,01$), Cr e Ni ($r=0,80$, $p<0,01$) e Mn com Pb ($r=0,83$, $p<0,01$). Alta correlação entre Fe e Zn também foi encontrado por Bech et al. (2008), ($r=0,83$, $p<0,01$) em solos de Manresa, Espanha e por Su e Yang (2008) nos solos da China. Na profundidade 2, foi observado comportamento semelhante a profundidade 1, apresentando também altas correlações entre Ni e Cu ($r=0,84$, $p<0,01$) e Zn ($r=0,75$, $p<0,01$), Ba e Mn ($r=0,85$, $p<0,01$), Cd e Zn ($r=0,83$, $p<0,01$), Cu e Mn ($r=0,76$, $p<0,01$) e Ba ($r=0,78$, $p<0,01$). Altas correlações entre os metais pesados sugerem que estes metais têm uma origem semelhante (GIL et al., 2004).

O DTPA foi extrator que apresentou maior quantidade de leituras em relação aos demais extratores, com o mínimo de 100 para Ni na profundidade 2 (Tabela 8). O elemento Ba teve correlação positiva ($p<0,01$) com Cd, Mn, Ni e Pb apenas na profundidade 2. O Cu correlacionou-se apenas com Mn na profundidade 1. O Cd se correlacionou positivamente com todos os elementos, com exceção de Ba e Cr, na profundidade 1. O Cr estabeleceu correlação apenas com Fe na profundidade 1 e com Mn, Ni, e Pb na profundidade 2, indicando a afinidade geoquímica entre estes metais.

Tabela 7 - Coeficiente de correlação entre metais pesados das amostras nas profundidades 1 e 2 dos solos do Estado do Pará, utilizando o extrator Mehlich-III

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
<u>Profundidade 1^w</u>									
	127 ¹	63	127	113	127	113	40	118	114
Ba	1								
Cd	0,68**	1							
Cr	0,04	-0,06	1						
Cu	0,41**	0,07	-0,04	1					
Fe	0,35**	0,70**	0,46**	0,13	1				
Mn	0,68**	0,28	-0,11	0,51**	0,05	1			
Ni	0,15	0,54	0,80**	0,11	0,83**	0,03	1		
Pb	0,70**	0,45*	0,15	0,23	0,30**	0,83**	0,06	1	
Zn	0,33*	0,67**	0,23	0,13	0,82**	0,27**	0,95**	0,33*	1
<u>Profundidade 2^z</u>									
	130 ¹	64	126	111	127	107	43	118	115
Ba	1								
Cd	0,82**	1							
Cr	-0,03	-0,24	1						
Cu	0,78**	0,33	-0,09	1					
Fe	0,43**	0,62**	0,51**	0,18	1				
Mn	0,85**	0,56**	-0,14	0,76**	0,15	1			
Ni	0,78**	0,47	0,34	0,84**	0,50*	0,70**	1		
Pb	0,49**	0,40*	0,05	0,16	0,40**	0,47**	0,11	1	
Zn	0,69**	0,83**	0,10	0,39**	0,67**	0,60**	0,75**	0,48**	1

¹Número de amostras analisadas^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

** Correlação significativa a 0,01; * Correlação significativa a 0,05.

O Fe e Mn correlacionaram positivamente com Cd, Ni, Pb e Zn nas duas profundidades. O Fe é um elemento especial quanto a sua classificação geoquímica, pois de acordo com Foster (1991), este elemento pertence em primeira ordem ao grupo dos elementos siderófilos (aqueles que quando fundidos tem afinidade ao ferro líquido), porém ele pode apresentar uma afinidade secundária, pertencendo ao grupo dos elementos calcófilos (aqueles que têm afinidade pelos grupos de enxofre) e litófilos (tem afinidade com os silicatos). Sugerindo que, além dos óxidos de Fe e Al, os óxidos de Mn, em condições naturais, sem contaminação antropogênica, também são importantes na adsorção de metais (FONTES; WEED, 1991; ALLOWAY, 1990). Valladares et al. (2009) em solos do Estado de São Paulo em uma área cultivada por vinhedos, com uso extrator DTPA, também encontraram

correlações positivas entre Fe e Cd. A adsorção de cádmio pelos óxidos de ferro, é relatado na literatura por diversos autores PIERANGELI et al. (2003).

Altas correlações positivas foram observadas nas profundidades 1 e 2, do elemento Ni com Cd ($r=0,71$ e $0,71$, $p<0,01$), com Mn e Ni ($r=0,72$ e $r=0,78$, $p<0,01$) e com Zn ($r=0,74$ e $r=0,72$, $p<0,01$), respectivamente. Correlação entre Ni e Zn ($r=0,68$) foi encontrada por Heredia (2009). Altas correlações também foram observadas para o Mn com Zn ($r=0,71$, $p<0,01$), na profundidade 1, e do Mn com Pb ($r=0,75$, $p<0,01$) na profundidade 2.

Tabela 8 - Coeficiente de Correlação entre metais pesados das amostras nas profundidades 1 e 2 dos solos do Estado do Pará, utilizando o extrator DTPA.

	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	<u>Profundidade 1^w</u>								
	120 ¹	126	123	132	132	132	116	132	132
Ba	1								
Cd	0,03	1							
Cr	-0,07	0,04	1						
Cu	0,19	0,37**	-0,15	1					
Fe	0,03	0,43**	0,29**	0,14	1				
Mn	0,11	0,57**	-0,08	0,30*	0,11	1			
Ni	-0,03	0,71**	-0,22	0,30*	0,43**	0,72**	1		
Pb	0,21	0,50**	-0,14	0,21	0,38**	0,46**	0,67**	1	
Zn	-0,13	0,42**	0,05	0,26*	0,46**	0,71**	0,74**	0,40**	1
	<u>Profundidade 2^z</u>								
	123 ¹	129	121	132	132	129	100	132	111
Ba	1								
Cd	0,59**	1							
Cr	-0,17	0,38**	1						
Cu	0,18	0,26*	0,01	1					
Fe	0,09	0,38**	0,15	0,14	1				
Mn	0,45**	0,52**	0,46**	0,15	0,23	1			
Ni	0,48**	0,71**	0,40**	0,13	0,44**	0,78**	1		
Pb	0,51**	0,30**	0,33*	0,13	0,28*	0,75**	0,61**	1	
Zn	0,25	0,48**	0,18	0,04	0,63**	0,48**	0,72**	0,42**	1

¹ Número de amostras analisadas

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.

^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

** Correlação significativa a 0,01; * Correlação significativa a 0,05.

2.3.3 Correlações entre os metais e os atributos do solo

A disponibilidade dos elementos no ambiente depende de sua presença na solução do solo. Esta é governada por fatores como a composição e reação do solo, as condições de oxirredução e a cinética das reações, que dependem de atributos do solo e de suas tendências em formar precipitados insolúveis e co-precipitados com outros minerais, assim como formam complexos com a matéria orgânica e são adsorvido por minerais (ALLEONI; BORBA; CAMARGO, 2005).

Os valores de pH apresentaram correlação negativa com o Al nas duas profundidades com o uso dos três extratores (Tabela 9, 10 e 11): Os valores de correlação para o Mehlich-I, Mehlich-III e o DTPA foi de $r=-0,65$, na profundidade 1 e de $r=-0,54$, e $r=-0,46$ na profundidade 2, respectivamente. Com aumento do pH do solo e consequente redução da acidez trocável há uma diminuição ou mesmo eliminação do efeito tóxico do Al, pois este é precipitado na forma de hidróxido (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Houve correlações positivas significativas do pH na profundidade 1 com os metais Mn, Ni, Pb e Zn, com o extrator Mehlich-I, assim como correlação negativa com o Cu, MO e CTC, na profundidade 2. Também foram encontradas correlações positivas entre o pH e os metais Pb e Zn na profundidade 1 e correlações negativas, na profundidade 2, entre a MO e CTC ($r=-0,32$, $r=-0,31$, $p<0,05$) com extrator Mehlich-III. Na extração realizada pelo DTPA o pH apresentou correlação positiva com Cu ($r=0,63$, $p<0,01$) na profundidade 1. Cancela et al. (2002) também encontraram correlação positiva entre pH e o Zn ($r=0,67$) com extrator Mehlich-III e correlação positiva entre pH e Cu-DTPA ($r=0,81$). O pH é frequentemente uma das variáveis que mais influência exerce na disponibilidade dos metais (ABREU et al., 2002).

Entre as características químicas do solo, o pH desempenha papel fundamental na solubilidade e na disponibilidade de metais pesados. De maneira geral, o aumento do pH do solo diminui a disponibilidade dos metais por meio de reações de precipitação e pelo aumento da adsorção por colóides de carga variável (SHUMAN, 1998). Borges e Coutinho (2004), observaram que com aumento do pH do solo, pela aplicação de biossólidos, ocorreu a redistribuição dos elementos Cu, Mn e Zn da fração trocável para a fração ligada a MO ou óxidos, menos disponível.

Observou-se na profundidade 2, para os extratores Mehlich-I, Mehlich-III e DTPA, alta correlação entre CTC e Al trocável ($r=0,68$, $p<0,01$; $r=0,68$, $p<0,01$; $r=0,69$, $p<0,01$, respectivamente). Tais resultados podem ser justificados em função da maior parte da CTC do

solo ser devida à desprotonação de grupamentos ácidos da matéria orgânica e da superfície de minerais do tipo 1:1 e de óxidos de ferro e alumínio (SPOSITO, 1989; PIERZYNSKI; SIMS; VANCE, 1994). Nos solos deste estudo que apresentam cargas variáveis, dependentes de pH, em estágio avançado de intemperismo, com a fração argila dominada por caulinita e oxihidróxidos de ferro e alumínio, a contribuição da matéria orgânica do solo para a CTC é elevada, podendo chegar a 90% (SILVA; MENDONÇA, 2007). A CTC é dependente tanto do teor de argila quanto do teor de matéria orgânica. No entanto, neste trabalho a CTC foi mais bem correlacionada com a matéria orgânica nas amostras de solo, porque a maioria dos solos estudados apresenta argila de baixa atividade.

A fração argila não apresentou correlação significativa com nenhum metal e a maioria dos atributos dos solos nas 2 profundidades, sendo esta relação observada nos três extratores utilizados neste estudo, exceto o Zn na profundidade 2 quando extraído pelo DTPA. A correlação significativa estabelecida entre Zn-DTPA e argila, é indicativo dos baixos teores deste metal em solos de textura arenosa. Correlação positiva entre argila e Zn foi encontrado por Tume et al. (2006) e por Bech et al. (2005) em solos naturais da Espanha com uso de extrator total (Água Régia). O elemento zinco apresenta uma alta afinidade com as superfícies das argilas e sesquióxidos, pois de acordo com Lindsay (1979), a argila é um dos principais componentes dos solos relacionados com os metais pesados, devido à alta afinidade dos elementos com minerais de argila.

Outros estudos têm demonstrado haver correlações entre alguns metais ou não metais (As, B, Co, Cu, Mn, Ni, Cr e Zn) com o teor de argila nos solos (TERMMERMAN et al., 2003; SU; YANG, 2008). Em estudo realizado no Paraná, com amostras de Latossolos, Argissolo, Cambissolos, Neossolo Litólico e Nitossolo, Souza et al. (1996) encontraram correlações positivas entre a quantidade de argila e os teores totais de Cr ($r = 0,88$, $p < 0,01$), Pb ($r = 0,72$, $p < 0,01$), Zn ($r = 0,77$, $p < 0,01$) e MO ($r = 0,80$, $p < 0,01$). Foi encontrado também correlação entre a argila e MO ($r = 0,25$, $p < 0,05$) na profundidade 1 e argila e o Al ($r = -0,25$, $p < 0,05$) na profundidade 2 nos extratores Mehlich-I e Mehlich-III. O conteúdo de MO e a argila são geralmente considerados atributos importantes na avaliação dos teores dos elementos químicos no solo, incluindo os metais pesados (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

As correlações da MO com Cr na extração com o DTPA, na profundidade 1 e Mn e Pb na profundidade 2 foram positivas, indicando que o conteúdo de material orgânico desses solos pode ser um fator que esteja contribuindo para complexação desses elementos em condições naturais (ABREU et al., 2007). Em solos de formação sedimentar do Norte da

França, Sterckeman et al. (2006) também encontraram correlação da MO com estes elementos, sendo também observadas correlações com Cu e Cd. Mitsios et al. (2005) obtiveram correlações positivas apenas entre a MO e o Zn, utilizando o DTPA como extrator. O elemento Ba, na profundidade 1, também correlacionou-se positivamente com a MO na extração pelo Mehlich III. A estabilidade desses complexos (MO-metal) é de grande importância, como no caso do Mn em que a ocorrência de deficiência de Mn a pH 6,5 é muito menor em solos com apreciáveis teores de MO do que em solos com teor baixo (ABREU et al, 2007). Segundo Kabata-Pendias (2001), o Pb é o metal que apresenta no solo, a maior afinidade por compostos orgânicos. O DTPA, por atuar como agente complexante, pode competir pelo Pb assim como por outros elementos com os compostos orgânicos, extraíndo em razão desse comportamento, maiores teores desses elementos do solo.

O Ba destacou-se entre os elementos no extrator Mehlich-III, pois apresentou na profundidade 1, correlações positivas ($p < 0,01$) com os atributos MO ($r = 0,44$), Al ($r = 0,36$), Fe ($r = 0,35$) e CTC ($r = 0,45$). Os elementos Cu e Mn não apresentaram correlação significativa com nenhum atributo do solo. Comportamento semelhante foi observado com os elementos Mn na profundidade 1 e Ba, Cr e Cu na profundidade 2, quando extraído pelo DTPA, que também não se correlacionaram com os atributos do solo.

O Fe nos extratores Mehlich-III e DTPA apresentou correlação positiva com Cd, Ni, Pb e Zn nas 2 profundidades. Este elemento se destacou no extrator Mehlich-III, pois se correlacionou positivamente com a matéria orgânica na profundidade 1, e a maioria dos metais. Oliveira; Nascimento (2006), também encontraram resultados que indicam que os teores de ferros potencialmente disponíveis estão ligados à matéria orgânica, de acordo com as altas correlações entre esta fração e os teores de CO dos solos. Altas correlações foram observadas do Fe com Ni ($r = 0,83$, $r = 0,50$) e Zn ($r = 0,82$, $r = 0,67$) nas 2 profundidades, indicando a ocorrência destes elementos no material de origem. Correlações positivas do Fe com Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn também foram encontradas por Sterckeman et al. (2006), em solos do Norte da França, por Su e Yang (2008), em solos da China e por Tume et al. (2006), em solos da Espanha para os elementos Ba, Cu, Cr e Ni.

Tabela 10 - Coeficiente de Correlação entre metais pesados e atributos dos solos nas profundidades 1 e 2 dos solos do Estado do Pará, utilizando o extrator Mehlich-III.

	Ba	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	pH	MO	Al	Fe	CTC	Argila
	Profundidade 1 ^w													
	127 ¹	63	127	113	113	40	118	114	132	132	132	127	132	132
pH	-0,06	0,19	0,07	0,11	0,24	0,28	0,26*	0,26*	1					
MO	0,44**	-0,20	0,08	0,11	0,01	0,05	0,16	0,05	-0,09	1				
Al	0,36**	-0,08	0,05	-0,09	-0,06	-0,02	0,04	0,08	-0,65**	0,23	1			
Fe	0,35**	0,62**	0,46**	0,14	0,05	0,83**	0,30*	0,82**	0,22	0,31*	0,12	1		
CTC	0,45**	-0,17	0,04	0,11	0,06	0,04	0,24	0,07	-0,13	0,69**	0,40**	0,21	1	
Argila	-0,09	0,13	0,22	-0,10	-0,12	-0,21	-0,01	-0,17	0,04	0,25*	0,04	0,04	0,22	1
	Profundidade 2 ^z													
	130 ¹	64	126	111	107	43	118	115	132	132	132	127	132	132
pH	0,09	0,10	-0,10	-0,001	-0,002	0,10	0,06	0,14	1					
MO	-0,11	-0,15	-0,12	0,01	-0,09	-0,14	-0,11	-0,13	-0,32*	1				
Al	0,01	0,06	-0,05	0,07	0,02	0,15	0,01	0,02	-0,54**	0,42**	1			
Fe	0,43**	0,57**	0,45**	0,18	0,15	0,50*	0,40*	0,67**	0,12	0,001	-0,004	1		
CTC	0,11	-0,05	-0,19*	0,24	0,12	0,25	0,10	-0,02	-0,31*	0,67**	0,68**	0,11	1	
Argila	-0,03	-0,15	0,17*	-0,06	-0,06	0,23	-0,15	0,16	0,24	-0,11	-0,25*	0,06	-0,22	1

¹Número de amostras analisadas

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.

^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

** Correlação significativa a 0,01; * Correlação significativa a 0,05.

Tabela 11 - Coeficiente de Correlação entre metais pesados e atributos dos solos nas profundidades 1 e 2 dos solos do Estado do Pará, utilizando extrator DTPA.

	Ba	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	pH	MO	Al	Fe	CTC	Argila
	Profundidade 1 ^w													
	120 ¹	126	123	132	132	116	132	132	132	132	132	132	132	132
pH	0,10	0,09	0,12	0,63**	0,22	0,002	0,01	0,18	1					
MO	-0,09	-0,06	0,53**	0,01	-0,17	-0,20	-0,07	-0,04	-0,09	1				
Al	0,03	-0,07	-0,10	-0,19	-0,20	-0,11	0,04	-0,19	-0,65**	0,23	1			
Fe	0,03	0,43**	0,29*	0,14	0,11	0,43**	0,38**	0,46**	-0,08	0,19	0,13	1		
CTC	0,48**	-0,06**	-0,03	0,12	-0,06	-0,18	0,02	-0,12	-0,13	0,69**	0,40**	0,16	1	
Argila	0,003	0,14	-0,21	0,29*	0,05	-0,03	0,10	-0,03	0,04	0,25*	0,04	-0,01	0,22	1
	Profundidade 2 ^z													
	123 ¹	129	121	132	129	100	132	111	132	132	132	132	132	132
pH	0,09	0,14	0,21	0,01	-0,13	-0,08	-0,21	0,08	1					
MO	0,10	0,04	-0,08	-0,05	0,42**	0,24	0,45**	0,23	-0,27**	1				
Al	0,06	0,002	-0,02	0,07	0,25	0,17	0,36**	0,35*	-0,46**	0,42**	1			
Fe	0,09	0,38**	0,15	0,14	0,23	0,44**	0,23*	0,63**	-0,39**	-0,05	0,06	1		
CTC	0,19	-0,09	-0,03	-0,07	0,38**	0,15	0,44**	0,17	-0,28**	0,67**	0,68**	-0,09	1	
Argila	-0,16	-0,01	-0,10	-0,05	-0,12	-0,11	-0,24	-0,26**	-0,06	-0,11	-0,25*	-0,05	-0,22	1

¹Número de amostras analisadas

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-2 m para todas as classes de solos.

^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

** Correlação significativa a 0,01; * Correlação significativa a 0,05.

2.4 CONCLUSÃO

Os teores disponíveis de metais pesados nos solos do Estado do Pará seguiram a seguinte ordem de disponibilidade, para Mehlich-I: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cd}$, para Mehlich-III: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd}$ e DTPA: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ba} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cd}$, sendo esta ordem, no geral, independente da profundidade.

A maioria dos solos apresentou teores de Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn menores que solos de outras regiões. Observou-se, também, que os teores disponíveis desses metais foram inferiores aos valores de referência estabelecidos pela CETESB, corroborando a necessidade de um maior conhecimento das diversidades regionais para a elaboração de normas nacionais.

Correlações significativas foram estabelecidas entre os metais e destes com a matéria orgânica, pH e capacidade de troca de cátions. Dessa forma, as elevadas correlações entre os extratores Mehlich I, Mehlich III e DTPA indicam a similaridade nas formas extraídas dos metais pelos extratores.

Os teores disponíveis dos metais determinados pelos extratores Mehlich-III, e DTPA nos solos do Estado do Pará, apresentaram as melhores correlações e foram considerados adequados para avaliação da disponibilidade desses elementos nos solos do Estado.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C.A.; NOVAIS, R.F.; RAIJ, B. van & RIBEIRO, A.C. Influência da reação do solo na extração de Manganês por diferentes extratores químicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p. 91-99, 1994.
- ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; RAIJ, B. V.; SANTOS, W.R. Comparação de métodos de análise para avaliar a disponibilidade de metais pesados em solos. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.19, p.463-468, 1995.
- ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; ANDRADE, J.C. Determinação de Cobre, ferro, Manganês, Zinco, Cádmio, Cromo, Níquel e Chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. Cap.16, p.240-250.
- ABREU, C.A.; VAN RAIJ, B.; ABREU, M.F.; GONZÁLEZ, A.P. Routine soil testing to monitor heavy metals and boron. **Scientia Agricola**. v.62, p.564-571, 2005.
- ABREU, C. A.; ABREU, M.F. & BERTON, R. S. Análise química do solo para metais pesados. In: CURI, N.; MARQUES, J. ; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.; LOPES, A.S.S.; ALVAREZ, V.H. Eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2 p.645-692.
- ABREU, C.A.; LOPES, A.S.; SANTOS, G.C.G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 645-736.
- ALLEONI, L.R.F.; IGLESIAS, C.S.M.; MELLO, S.C.; CAMARGO, O.A.; CASAGRANDE, J.C.; LAVORENTI, N.A. Atributos do solo relacionados à adsorção de cádmio e cobre em solos tropicais. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.27, 729-737, 2005.
- ALLEONI, L.R.F.; BORBA, R.P.; CAMARGO, O.A. Metais pesados: da cosmogênese aos solos brasileiros. In: Vidal-Torrado, P.; Alleoni, L.R.F.; Cooper, M.; Silva, A.P.; Cardoso, E.J. Ed. **Tópicos de ciência do solo**. – Vol. 1. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. pg. 1-42.
- ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.). **Heavy metals in soils**. New York. John Wiley, 1990. p. 339.

- _____. **Heavy metal in soils**. 2nd ed. London: Blackie Academic, 1995. 368 p.
- BATAGLIA, O.C.; RAIJ, B. V. Eficiência de extratores dos micronutrientes na análise de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.205- 212, 1989.
- BECH, J., TUME, P., LONGAN, LLUIS., REVERTER, F. baseline concentrations of trace elements in surface soils of the torrelles and sant climent municipal districts (catalonia, spain). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 108, p. 309-322. 2005.
- BECH, J., TUME, P., LONGAN, LLUIS., REVERTER, F., BECH, J., TUME, L., TEMPIO, M. Concentration of Cd, Cu, Pb, Zn, Al, and Fe in soils of Manresa, NE Spain. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.145, p.257-266. 2008.
- BORGES, M.R. & COUTINHO, E.L.M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. II- disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.28, p.557-568, 2004.
- BURAK, D.L. **Geoquímica e Distribuição de metais pesados em solos da Região de Unaí, Paracatu e Vazante, MG**. 2008. 160 p. Tese (Doutorado em Solo e Nutrição de Plantas), Viçosa. 2008.
- BURT, R., WILSON, M.A.; MAYS, M. D.; LEE, C. W. Major and trace elements of selected pedons in the USA. **Journal Environmental Quality**. Vol.32, p. 2109-2121, 2003.
- CAIRES, S.M. **Determinação dos teores naturais de metais pesados em solos do Estado de minas gerais como subsídio ao estabelecimento de valores de referência de qualidade**. 2009. 321 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2009.
- CAMPOS, M. L.; PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES J. J.; CURI, N. Baseline Concentration of Heavy Metals in Brazilian Latosols. **Communication Soil Science And Plant. Analysis**. vol .34, p.547-557, 2003.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos no solo. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. V.; ABREU, C. A. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFOS, p. 89 – 119, 2001.

CANCELA, R.C.; ABREU, C.A.; PAZ-GONZÁLEZ, A. DTPA and Mehlich micronutrient extractability in natural soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.33, p. 2879- 2893, 2002.

CHEN, M.; MA, L.Q.; HARRIS, W.G. Baseline concentrations of 15 elements in Florida surface soils. **Journal of Environmental Quality**, v.28, p.1173-1181, 1999.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e água subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2001. 92 p. (Relatório Final. Série Documentos Ambientais).

_____. **Decisão de Diretoria nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências**. São Paulo, 2005, publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo de 03 de dezembro de 2005, retificada em 13 de dezembro de 2005. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf. Acesso em: 18 nov. 2009.

COSTA, C.N.; MEURER, E.J.; BISSANI, C.A.; SELBACH, P.A. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: Meurer, E.J. **Fundamentos de Química do Solo**. 2ª ed. Porto Alegre: Gêneses, 2004. p. 239 – 282.

COSTA, C. N.; MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; SELBACH, P. A. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: **Fundamentos de química do solo**. 3ed. Porto Alegre: Evangraf, p. 213 – 250, 2006.

FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Seleção de extratores químicos para avaliação da disponibilidade de zinco em solos do Estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, p.293-304, 1992.

FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Iron oxides in selected Brazilian oxisols: I. Mineralogy. **Soil Science Society of American Journal**, v.55, p. 1143-1150, 1991.

GIL, C., BOLUDA, R., RAMOS, J. Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almería (Spain). **Chemosphere**, v.55, p.1027–1034. 2004.

HEREDIA, O.S., CIRELLI, A.S. Trace elements distribution in soil, pore water and groundwater in Buenos Aires, Argentina. **Geoderma**, v.149, p.409-414, 2009.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants** – 3^a ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001. 413p.

LINDSAY, W.L.; NORVELL, W.A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 421-428, 1978.

MA, L.Q.; TAN, F.; HARRIS, W.G. Concentration and distributions of eleven metals in Florida soils. **Journal of Environmental Quality**, v.26, p.769-775, 1997.

MARQUES, J.J.G.S.M., CURI, N., SCHULZE, D.G. Trace elements in Cerrado soils. In: ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 103-142.

MARQUES, J.J., SCHULZE, D.G.; CURI, N.; MERTZMAN, S.A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v.121, p.31-43, 2004.

MARTINEZ-LLADÓ, X.; VILÀ, M.; MARTÍ, V.; ROVIRA, M.; DOMÈNECH, J.A.; PABLO, J. trace element distribution in topsoils in Catalonia: Background and reference values and relationship with regional geology. **Environmental Engineering Science**, v.25, p. 863-878, 2008.

MATTIAZZO, M.E; ANDRADE, C.A. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais:lixiviação de N orgânico e toxicidade de metais pesados. In: WAGNER BETTIOL,W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariuna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 203-213.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. Raleigh: North Carolina Soil Testing Division, 1953. 23 p.

_____. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.15, p.1409-1416, 1984.

MILAGRES, J.J.M.; ALVAREZ, V.H.; CANTARUTTI,R.B.; NEVES, J.C.L. Determinação de Fe,Zn, Cu, e Mn extraído do solo por diferentes extratores e dosados por espectrofotometria de emissão ótica em plasma induzido e espectrofotometria de absorção atômica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.31, p.237-245. 2007.

MITSIOS, I.K.; GOLIA, E.E.; TSADILAS, C.D. Heavy metal concentrations in soils and irrigation waters in Thessaly Region, Central Greece. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, n.4-6, p.487-501, 2005.

MOREIRA-NODERMANN, L.M. A Geoquímica e o meio ambiente. **Geochemica Brasiliensis**, v.1, n.1, p.89-107, 1987.

NASCIMENTO, C.W.A.; FONTES, R.L.F.; NEVES, J.C.L.; MELÍCIO, A.C.D.F. Dessorção, extração e fracionamento de manganês em Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.589-597, 2002.

OLIVEIRA, T.S.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M.; HORN, A.H. Relationship between magnetization and trace elements content of Brazilian soils from different parent materials. **Soil Science**, v.165, p.825-834, 2000.

OLIVEIRA, A.B.; NASCIMENTO, C.W.A.; Formas de Manganês e Ferro em solos de Referências de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.99-110, 2006.

PEREIRA, M.G.; PÉREZ, D.V.; VALLADARES, G.S.; SOUZA, J.M.P.F.; ANJOS, L.H.C. Comparação de métodos de extração de cobre, zinco, ferro e manganês em solos do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.655-660, 2001.

PÉREZ, D.V.; SALDANHA, M.F.C.; MENEGUELLI, N.A.; MOREIRA, J.C.; VAITSMAN, D.S. **Geoquímica de alguns solos brasileiros**. Pesq. And. CNPS, vol. 4, p. 1-14, 1997.

PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; CURTI, N.; SILVA, M .L. N.; OLIVEIRA, L.R.; LIMA, J.M. Teor total e capacidade máxima de adsorção de chumbo em Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 279-288, 2001.

PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; OLIVEIRA, L.R.; CURTI, N.; SILVA, M.L.N. Efeito da força iônica da solução de equilíbrio na adsorção de cádmio em latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.737-745, 2003.

PIERZYNSKI, G.M.; SIMS, J.T.; VANCE, G.F. **Soils and environmental quality**. Boca Raton: Lewis, 1994. 313 p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.p. 285.

ROSS, S.M. **Toxic metals in soil-plants systems**. Chichester: John Willey & Sons, 1994. 469p.

SALDANHA, M. F. C.; PÉREZ, D. V.; MENEGUELLI, N. A.; MOREIRA, J. C.; VAITSMAN, D. S. **Avaliação de cinco tipos de abertura para determinação dos teores de ferro, manganês e zinco em alguns solos brasileiros**. Pesquisa em andamento EMBRAPA-CNPS, n.1, p.1-10, 1997. Disponível em <www.cnps.embrapa.br/solosbr/pdfs/pesquisaand_011997.pdf>. (Acessado em fev 2010).

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 276-274-374.

SOUZA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 206-274.

SOUZA, M.L.P.; ANDREOLI, C.V.; AMARI, M.B.; DOMASZAK, S.C. Levantamento preliminar dos teores de metais pesados em alguns solos do Paraná. **Revista Técnica da Sanepar**, Curitiba, v. 5, p. 68-75, 1996.

STERCKMAN, T., DOUAY, F., BAIZE, D., FOURRIER, H., PROIX, N., SCHVARTZ, C. Trace elements in soils developed in sedimentary materials from Northern France. **Geoderma**, v.136, p. 912-929. 2006.

SHUMAN, L.M. Effect of organic waste amendments on cadmium and lead in soil fractions of two soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.29, p.2939-2952, 1998.

SU, Y.-Z.; YANG, R. Background concentrations of elements in surface soils and their changes as affected by agriculture use in the desert-oasis ecotone in the middle of Heihe River Basin, north-west China. **Journal of geochemical exploration**, v.98, p. 57-64, 2008.

TERMMERMAN, L., VANOGEVA, L., BONN, W., HOENING, G. Heavy metal content of arables soils in northern Belgium. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 148, p.61-73. 2003.

TUME, P., BECH, J., LONGAN, L., TUME, L., REVERTER, F., SEPULVEDA, B. Trace elements in natural surface soils in saint climent (Catalonia, Spain). **Ecological engineering**, v.27, p.145-152. 2006.

VALLADARES, G.S.; CAMARGO, O.A.; CARVALHO, J.R.P.; SILVA, A.M.C. Assesment of heavy metals in soil of a vineyard region with the use of principal component analysis. **Scientia Agricola**, v. 66, n.3, p.361-367, 2009.

WALLACE. G.A. & WALLACE, A. Lead and other potentially toxic heavy metals in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.25, p.137-141, 1994.

CAPÍTULO 3

ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DO ESTADO DO PARÁ, EM CONDIÇÕES NATURAIS

RESUMO A Amazônia, bem como o Estado do Pará encontra-se recoberto em sua maior extensão, pela floresta tropical úmida. No Estado há a ocorrência de diversas classes de solos, sendo a dos Latossolos e Argissolos as predominantes. Estes se caracterizam por serem altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural. Quando submetidos ao manejo e uso inadequados diminuem rapidamente a capacidade produtiva, ocasionando o abandono dos mesmos. Dessa forma, para o desenvolvimento da agricultura sustentável é importante conhecer a fertilidade natural dos solos. O objetivo deste estudo foi caracterizar os atributos químicos das principais classes de solos do Estado do Pará, em condições naturais. A amostragem foi realizada em solos representativos do Estado do Pará sob vegetação natural com nenhuma ou mínima interferência antrópica, em duas profundidades. As amostras de solos foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de inox de malha de dois mm, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Na TFSA foram determinados pH em água, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{+3} trocáveis, acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica. Com os resultados obtidos nas análises do complexo sortivo, foram calculadas a soma de bases trocáveis (SB), a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC) e as saturações por bases (V%) e por Al (m%). Foram feitas análises estatísticas descritivas e de correlações de Pearson. As amostras de solos analisadas apresentaram grande variação nas características químicas em função das diferentes classes e das profundidades. A maioria das classes de solos apresentou elevada acidez, teor baixo de matéria orgânica; baixos níveis de P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e altos níveis de Al^{3+} e H + Al.

Palavras chave: saturação por bases, capacidade de troca catiônica, matéria orgânica do solo, pH

ABSTRACT: The Amazon and Para State are embraced by the humid tropical forest in their extension. In that State there are several soil classes and the predominant are the Oxisols and Ultisols ones. They are high intempered and they have a natural low fertility. When they are submitted to bad use and managements they quickly decrease their productive capacity, what make them be abandoned. In this way, the sustainable agriculture development is necessary and important to the population's comfort, as the soil fertility maintenance with an adequate level is an important component to the production sustainable development. The information about natural soil fertility in Para State still is limited; however they are determinants for its adequate use and management. The aim of this study was chemically to characterize the attributes to the soil classes of Para State in natural conditions. The sampling was realized in representative soils in Para under natural vegetation with any or minimum anthropic interference in two depths. The soil samples were dried on air, unclodded and sieved on a mesh of 2 mm to obtain the thin soil dried on air (TSDA). In the TSDA it was determined pH in changeable water, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and Al³⁺, potential acidity (H+Al) and organic matter. With the obtained results in the sorptive complex analysis the sum of changeable basis were calculated (BS), the capacity of cationic exchange to pH 7,0 (CTC) and the basis saturations (V%) and for Al (m%). Descriptive statistics and Pearson correlations analysis were made. The analyzed soil samples presented a great variation in the chemical characteristics due to the different classes and to the depths. The majority soil classes presented high acidity, low content of organic matter; low level of P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and high level of Al³⁺ and H + Al.

Key – words: saturation for basis, cationic Exchange capacity, soil organic matter, pH.

3.1 INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira possui uma superfície de 5.033.072 km², ocupando 69% do território amazônico continental e encontra-se recoberta em sua maior extensão, pela floresta tropical úmida, que abrange os Estados do Pará, Amazonas, Acre, Amapá, Rondônia, Roraima e parte do Estado do Maranhão, Goiás e Mato Grosso.

Os solos do Estado do Pará são caracterizados especialmente pela intensiva lixiviação e intemperismo a que são submetidos. Apresentando, na maioria das vezes, baixa disponibilidade de nutrientes, baixa fertilidade e baixa capacidade de troca catiônica como consequência da presença dominante da argila do tipo caulinita e de óxidos de ferro e alumínio (FALESI, 1986).

Sua fertilidade natural é mantida principalmente pela ciclagem de nutrientes, como resultado dos processos biogeoquímicos. No entanto, as derrubadas e queimadas que vêm ocorrendo no Estado, expõem o solo aos efeitos erosivos ocasionados pelos altos índices de chuvas característicos da região.

As mudanças na utilização do solo provocam um desequilíbrio no ecossistema e nas propriedades intrínsecas da nova vegetação, uma vez que o manejo adotado influencia os processos físico-químicos e biológicos do solo, modificando suas características e, muitas vezes, propiciando sua degradação (SOUZA; ALVES, 2003).

As informações disponíveis sobre a fertilidade natural dos solos do Estado do Pará ainda são escassas, e principalmente, distribuídas por estudos isolados e muitas vezes restritos a uma classe de solo.

Desta forma pretendeu-se com esse trabalho testar a hipótese: ocorrem diferenças nos atributos químicos nos solos do Estado do Pará, em função das diferentes classes.

O objetivo deste estudo foi caracterizar os atributos químicos das classes de solos mais representativas do Estado do Pará, em condições naturais.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A amostragem foi realizada em solos representativos do Estado do Pará, em diferentes classes de solos (Latossolo, Argissolo, Nitossolo, Gleissolo, Plintossolo, Neossolo e Cambissolo), sob vegetação natural e/ou mínimo de interferência antrópica. As amostras foram coletadas com trado tipo Holandês de aço inox em duas profundidades, e armazenadas em sacos plásticos identificados, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de inox de malha de 2 mm, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Química do Solo da ESALQ/USP. Os atributos químicos determinados foram pH, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{+3} trocáveis, acidez potencial (H+Al) e carbono orgânico.

Os valores de pH foram determinados potenciometricamente em suspensões (TFSA) em água na proporção solo:solução de 1:2,5 (RAIJ; QUAGGIO, 2001). Os teores de fósforo e potássio foram extraídos por Mehlich-I (MEHLICH, 1953), os teores de cálcio e magnésio com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ (CANTARELLA et al., 2001). O fósforo foi determinado por colorimetria; cálcio e magnésio por espectrometria de absorção atômica, e potássio por fotometria de emissão de chama. O alumínio trocável foi extraído por solução de KCl 1 mol L⁻¹, e determinado por titulação com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹ (QUAGGIO; RAIJ, 2001). A acidez potencial (H+Al) foi determinada com solução de acetato de cálcio 1 mol L⁻¹, com posterior titulação com hidróxido de sódio 0,025 mol L⁻¹ (QUAGGIO; RAIJ, 2001). Os teores de carbono orgânico foram determinados pelo método colorimétrico, utilizado como procedimento de rotina em amostras de solo, com dicromato de sódio (CANTARELLA; QUAGGIO, 2001).

De posse dos resultados obtidos das análises químicas, foram calculadas a soma de bases trocáveis (SB), a capacidade de troca catiônica total (CTC) e as saturações de bases (V%) e de Alumínio (m%). Os dados de atributos químicos foram classificados em muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, de acordo com a classificação proposta por Alvarez et al. (1999).

Foram realizadas análises estatísticas descritivas dos atributos químicos utilizando o Microsoft Excel, assim como Correlações de Pearson com dados médios

aos níveis de 1 e 5% de significância, com a utilização do programa estatístico SAEG versão 8.1.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para os atributos dos solos do Estado do Pará (Tabelas 12 e 13) foram em sua maioria determinados a partir de amostras coletadas em duas principais classes, Latossolos e Argissolos, seguidas dos Nitossolos, Plintossolos, Neossolos, Gleissolos e Cambissolos.

3.3.1 Latossolos

O pH (H_2O) das amostras de Latossolos apresentaram valor médio na profundidade 1 (0-0,2 m) de 4,4, cujos valores mínimo e máximo variaram de 3,3 a 6,4 enquanto que na profundidade 2 (0,8-1,0 m) o valor médio foi de 4,7, e a variação entre o mínimo e o máximo foi de 3,8 a 6,1 (Tabelas 12 e 13). Segundo Alvarez et al. (1999), os valores médios de pH, para as duas profundidades, são classificados como muito baixos. Em solos do Estado do Amazonas Moreira e Fageria (2009), avaliando 3340 amostras de solos, na profundidade de 0-0,2 m, em diferentes ecossistemas, observaram uma variação do pH de 3,0 a 7,0, cujo valor médio foi de 4,4. Estudando solos naturais do Cerrado, Marques et al. (2004), encontrou valores de pH (H_2O) que variaram de 5,0 e 5,5 nas profundidades de 0-0,2 m e 0,8-1,0 m, respectivamente. As principais causas dos baixos valores de pH nos solos do Estado são a elevada intemperização em que se encontram e a rápida e contínua decomposição do material orgânico causada pelas altas temperaturas e umidade, liberando íons H^+ (MALAVOLTA, 1987; SOUZA et al., 2007).

O teor de matéria orgânica (MO) nos Latossolos apresentou uma menor variação na profundidade 1 ($CV\% = 28,86$) do que na profundidade 2 ($CV\% = 45,56$), (Tabelas 12 e 13). Os valores médios foram de $24,9 \text{ g kg}^{-1}$ e $9,9 \text{ g kg}^{-1}$, nas

profundidades 1 e 2, respectivamente, sendo classificados como valor médio e baixo (ALVAREZ et al., 1999). Os valores mínimos nas profundidades 1 e 2 foram de 11,16 e 4,65 g kg⁻¹ e máximos de 46,50 e 48,36 g kg⁻¹, respectivamente. Em estudo com Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo da Amazônia, Demattê e Demattê (1993), observaram uma variação da MO de 3,4 a 82,7 g kg⁻¹ e 9,5 a 74,1 g kg⁻¹, respectivamente, na camada de 0-15 cm de profundidade. Os valores médios de MO observados nos solos, em áreas sob vegetação nativa, embora apresente condições de elevada decomposição, são devidos a grande quantidade de folhas, galhos e troncos que são depositados no solo pela vegetação (ciclagem). Além disso, os baixos valores de pH dos solos contribuem para retardar as reações de mineralização (MALAVOLTA, 1983). Em solos do Cerrado brasileiro, Marques et al. (2004) observaram grande variação no teor de carbono orgânico, com valores médios de 17 ± 7 g kg⁻¹, para a camada superficial e 6 ± 2 g kg⁻¹, para camada subsuperficial. Observaram, ainda, que os solos sob floresta tropical semidecídua apresentavam maiores teores de carbono orgânico, que aqueles sob vegetação de cerrado.

O teor de P disponível variou de 0,42 a 103,99 mg kg⁻¹ na profundidade 1 e de 0,02 a 28,29 mg kg⁻¹ na profundidade 2. Variações tão expressivas (CV%=283 e 217, respectivamente) nas profundidades 1 e 2, assim como valores máximos elevados (Tabelas 12 e 13), podem ser justificados pela presença de amostras coletadas em solos com horizonte A antrópico, denominado Terra Preta de Índio. Fato justificado pelos baixos teores médios de P disponível de 7,37 e 2,91 mg kg⁻¹, para as profundidades 1 e 2, enquadrando-se, segundo a classificação proposta por Alvarez et al. (1999), em médio e baixo, respectivamente.

Moreira e Fageria (2009) também encontraram grande variação para o teor de P disponível em solos do Estado do Amazonas, com valores variando de 0,06 a 271 mg kg⁻¹ e com valor médio de 5,1 mg kg⁻¹, na profundidade de 0-0,2 m. Segundo Falesi (1986) os teores de P disponível são baixos nos solos da Amazônia. Sanchez e Salinas (1981) estimaram que 96% dos solos da região amazônica são deficientes em P e cerca de 60 a 80% desses encontram-se fixados com material orgânico.

O teor de K variou de 0,001 a 0,193 e 0,001 a 0,127 cmol_c kg⁻¹ nas profundidades 1 e 2 respectivamente. Altos valores de CV (119% na profundidade 1 e 166% na profundidade 2) indicam uma grande variabilidade na disponibilidade de K nos Latossolos do Estado do Pará. O teor médio de K encontrado nesse trabalho foi de

0,043 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na profundidade 1 e 0,018 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na profundidade 2, sendo classificados de acordo com Alvarez et al. (1999) como muito baixos.

Moreira e Fageria (2009), em solos do Estado do Amazonas, encontraram o valor de 0,09 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K trocável na profundidade de 0-0,02 m, sendo superior ao encontrado nesse trabalho (0,043 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) para a mesma profundidade. Por outro lado, aqueles autores constataram variação dos teores de K nos solos de 106%, próxima a observada neste trabalho.

De acordo com Fanning et al. (1989) e Melo et al. (2000), em solos altamente intemperizados de regiões tropicais úmidas, ocorrem teores de K total desde muito baixos (150 mg kg^{-1}) até valores muito altos (2.000 mg kg^{-1}). No entanto, minerais primários fontes do nutriente, como micas e feldspatos, apresentam baixa concentração nestes solos. Melo et al. (2002), obtiveram teores muito baixos de mica na fração argila de Latossolos de diferentes regiões do Brasil, com valores entre 0,4 e 11,8 g kg^{-1} .

Os teores médios das bases trocáveis (Ca^{+2} e Mg^{+2}), e os valores da CTC e saturação por bases (V%) foram, na profundidade 1, (1,81 e 0,37 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 6,62 e 25,73% respectivamente), superiores aos encontrados na profundidade 2 (0,96 e 0,19 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 3,33 e 17,61 %). Foi observada uma grande variação entre os valores destas variáveis, apresentando valores mínimos próximos nas 2 profundidades, porém com valores máximos elevados na profundidade 1, exceto, para a saturação por bases (Tabelas 12 e 13), que apresentou valores máximo elevados e próximos em ambas profundidades.

Os teores médios de Al trocável e acidez potencial foram maiores na profundidade 1 (1,01 e 4,40 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) do que na profundidade 2 (0,74 e 2,48 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Observou-se que estas variáveis (Tabelas 12 e 13), nas duas profundidades, variaram nos parâmetros de classificação da fertilidade proposta por Alvarez (1999) apresentando-se como alto e médio para (Al%) e médio a baixo para (m%).

Os valores médios de saturação por Al^{+3} foi superior na profundidade 2 (64,01%) em relação a profundidade 1 (48,86%), classificados como valores alto e médio, respectivamente (ALVAREZ, et al. 1999). Destaca-se ainda o valor máximo de 99,17% encontrado para a saturação por Al^{+3} na profundidade 2. Isso ocorre devido a baixa CTC nessa profundidade, aliada ao baixo teor de matéria orgânica, consequências da instabilidade mineralógica da fração argila (caulinita) (DEMATTE ; DEMATTE, 1993).

Tabela 12 - Estatística descritiva da fertilidade dos solos do Estado do Pará na profundidade 1.

Estatística	pH H ₂ O	M.O g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K	Ca	Mg cmol _c kg ⁻¹	Al	H+Al	CTC	V		m
										----- % -----		
Latosolo												
MÉDIA	4,44	24,91	7,37	0,043	1,81	0,37	1,01	4,40	6,62	25,73		48,86
MÍNIMO	3,25	11,16	0,42	0,001	0,01	0,02	0,04	0,64	0,79	1,80		0,26
MÁXIMO	6,36	46,50	103,99	0,193	13,65	1,90	4,11	9,06	19,15	85,62		93,58
DESVIO PADRÃO	0,84	7,19	20,93	0,051	3,03	0,43	0,97	2,00	3,58	24,51		33,36
C.V	18,91	28,86	283,90	119,01	167,65	117,48	96,03	45,41	54,10	95,27		68,28
CLASS. FERTILIDADE	MB	M	M	MB	M	B	A	M	M	B		M
Argissolo												
MÉDIA	4,18	19,04	2,08	0,024	0,74	0,21	0,83	3,68	4,53	18,82		55,43
MÍNIMO	3,58	13,95	0,48	0,001	0,01	0,02	0,17	1,72	2,64	0,69		7,96
MÁXIMO	4,94	26,97	6,13	0,121	2,02	0,71	1,89	6,78	7,56	52,40		95,73
DESVIO PADRÃO	0,40	3,69	1,21	0,030	0,58	0,17	0,48	1,25	1,13	15,34		30,52
C.V	9,51	19,38	57,94	122,20	78,10	81,05	57,45	33,91	24,92	81,54		55,05
CLASS. FERTILIDADE	MB	B	MB	MB	B	B	M	M	M	B		A
Nitossolo												
MÉDIA	4,46	20,46	1,12	0,046	2,92	0,75	0,78	4,02	7,74	38,77		42,79
MÍNIMO	3,49	18,60	0,23	0,010	0,07	0,17	0,07	2,12	5,67	4,28		0,76
MÁXIMO	5,37	22,32	2,80	0,091	7,67	1,42	1,62	5,60	11,28	81,21		85,18
DESVIO PADRÃO	0,73	1,32	0,87	0,040	3,31	0,63	0,77	1,61	2,37	37,58		45,56
C.V	16,47	6,43	77,71	87,09	113,25	83,75	98,39	40,02	30,58	96,94		106,46
CLASS. FERTILIDADE	B	M	MB	MB	A	M	M	M	M	B		M
Plintossolo												
MÉDIA	4,76	29,14	0,87	0,031	0,60	0,13	1,27	5,96	6,73	10,38		70,47
MÍNIMO	4,58	15,81	0,30	0,019	0,06	0,03	0,94	3,06	3,17	2,63		33,16
MÁXIMO	4,90	39,06	1,33	0,040	1,61	0,30	1,91	8,96	9,20	25,02		89,49
DESVIO PADRÃO	0,17	11,99	0,52	0,011	0,88	0,15	0,55	2,95	3,16	12,69		32,31
C.V	3,46	41,16	60,17	34,22	145,09	108,51	43,32	49,52	46,94	122,27		45,85
CLASS. FERTILIDADE	B	M	MB	MB	B	MB	A	A	M	MB		A

Tabela 13 - Estatística descritiva da fertilidade dos solos do Estado do Pará na profundidade 2.

Estatística	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			cmol _c kg ⁻¹					%
Latossolo											
MÉDIA	4,70	11,19	2,96	0,018	0,96	0,19	0,74	2,48	3,33	17,61	64,01
MÍNIMO	3,79	4,65	0,02	0,001	0,01	0,01	0,03	0,98	1,30	0,44	0,92
MÁXIMO	6,10	48,36	28,29	0,127	5,12	1,51	2,31	6,84	7,06	85,22	99,17
DESVIO PADRÃO	0,59	5,10	6,37	0,030	1,43	0,26	0,57	1,07	1,66	22,29	33,28
C.V	12,66	45,56	215,27	165,87	150,02	138,11	76,37	43,10	49,88	126,60	52,00
CLASS. FERTILIDADE	B	B	B	MB	B	B	M	B	B	MB	A
Argissolo											
MÉDIA	4,40	9,20	0,90	0,007	0,12	0,07	1,10	2,62	2,81	6,18	86,21
MÍNIMO	3,89	5,58	0,02	0,001	0,01	0,01	0,53	1,38	1,39	0,60	66,06
MÁXIMO	5,11	11,16	6,60	0,045	0,29	0,22	2,47	4,32	4,68	18,80	98,48
DESVIO PADRÃO	0,33	1,23	1,31	0,010	0,07	0,05	0,59	0,74	0,82	4,20	9,07
C.V	7,47	13,41	145,67	138,62	61,19	72,54	53,56	28,46	29,19	67,91	10,52
CLASS. FERTILIDADE	MB	B	MB	MB	MB	MB	A	M	B	MB	MA
Nitossolo											
MÉDIA	4,58	9,92	1,52	0,016	2,18	0,87	0,34	2,82	5,15	34,50	39,18
MÍNIMO	4,24	8,37	0,99	0,014	0,17	0,12	0,09	2,08	3,09	3,65	1,56
MÁXIMO	4,90	11,16	1,95	0,019	3,83	1,83	0,62	3,38	7,75	73,18	83,81
DESVIO PADRÃO	0,35	1,13	0,35	0,003	1,56	0,82	0,25	0,45	2,13	32,01	40,60
C.V	7,55	11,35	23,04	18,73	71,56	94,47	74,71	16,05	41,31	92,80	103,62
CLASS. FERTILIDADE	B	B	MB	MB	M	M	B	M	M	B	M
Plintossolo											
MÉDIA	4,64	8,68	1,50	0,011	0,03	0,03	1,13	2,52	2,57	2,21	93,80
MÍNIMO	4,52	7,44	0,51	0,004	0,01	0,02	0,52	1,82	1,91	0,87	85,34
MÁXIMO	4,84	10,23	2,50	0,019	0,05	0,04	1,88	3,56	3,60	4,68	98,10
DESVIO PADRÃO	0,17	1,42	1,41	0,008	0,03	0,01	0,69	0,92	0,90	2,14	7,33
C.V	3,76	16,37	93,80	73,33	90,09	47,14	61,13	36,45	35,17	96,75	7,81
CLASS. FERTILIDADE	B	B	MB	MB	MB	MB	A	M	B	MB	MA

Tabela 13 - Estatística descritiva da fertilidade dos solos do Estado do Pará na profundidade 2. (continuação...)

Estatística	pH H ₂ O	M.O g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K	Ca	Mg	-----cmol _c kg ⁻¹ -----			CTC	V	m	----- % -----
							Al	H+Al					
Neossolo													
MÉDIA	4,19	9,92	5,04	0,004	-	-	0,54	2,63	2,64	0,15	99,24		
MÍNIMO	4,06	9,30	1,67	0,004	-	-	0,42	2,32	2,32	0,14	99,09		
MÁXIMO	4,36	10,23	7,92	0,004	-	-	0,74	2,82	2,82	0,17	99,48		
DESVIO PADRÃO	0,16	0,54	3,15	0,000	-	-	0,18	0,27	0,27	0,02	0,21		
C.V	3,71	5,41	62,57	0,00	-	-	32,93	10,37	10,35	10,98	0,21		
CLASS. FERTILIDADE	MB	B	B	MB	-	-	M	M	B	MB	MA		
Gleissolo													
MÉDIA	3,50	30,46	11,52	0,082	5,48	3,48	6,28	12,19	21,23	48,80	36,40		
MÍNIMO	2,27	9,30	0,71	0,019	2,69	2,43	0,35	2,78	11,46	18,85	2,40		
MÁXIMO	4,88	93,00	42,72	0,157	11,77	4,07	23,34	33,84	41,70	83,67	74,81		
DESVIO PADRÃO	1,09	26,05	13,12	0,053	3,81	0,61	6,47	9,86	8,83	23,61	24,21		
C.V	31,06	85,52	113,87	64,90	69,51	17,49	102,98	80,94	41,57	48,38	66,52		
CLASS. FERTILIDADE	MB	M	A	B	MA	MA	M	MA	MA	M	M		
Cambissolo													
MÉDIA	4,96	70,06	5,53	0,013	1,63	0,36	0,59	13,91	15,91	12,64	22,31		
MÍNIMO	4,74	55,80	2,48	0,010	1,44	0,25	0,33	12,44	14,14	11,41	13,71		
MÁXIMO	5,11	87,42	7,31	0,019	1,73	0,49	0,90	16,12	18,20	14,48	28,78		
DESVIO PADRÃO	0,19	16,04	2,65	0,005	0,16	0,12	0,29	1,95	2,08	1,62	7,75		
C.V	3,89	22,89	47,98	37,71	9,88	33,87	48,45	14,02	13,06	12,83	34,76		
CLASS. FERTILIDADE	B	MA	M	MB	M	B	M	MA	MA	MB	B		

pH: medido em água (RAIJ; QUAGGIO, 2001); P, Ca, Mg e K: método Mehlich-1 (VAN RAIJ & QUAGGIO, 2001); Al: extraído em KCl (CANTARELLA et al., 2001); H+Al: acidez potencial medida em acetato de cálcio 1 mol L⁻¹ (QUAGGIO & VAN RAIJ, 2001); Matéria Orgânica (CANTARELLA; QUAGGIO, 2001); Soma de Bases: SB = Ca+Mg+K; Capacidade de Troca de Cátions (pH7): CTC = SB+(H+Al); Saturação por Bases (V%): V% = (SB/CTC)*100; Capacidade de Troca de Cátions efetiva (CTCef): CTCef = SB+Al; Saturação por alumínio (m%): m% = (CTCef/SB)*100

Notas: Classificação da fertilidade de acordo com Alvarez et al. (1999): MB - Muito baixo; B - Baixo; M - Médio; A - Alto; MA - Muito alto.

3.3.2 Argissolos

Os valores médios de pH (H_2O), matéria orgânica, P disponível, Al trocável, Acidez potencial e CTC apresentaram pequena variação entre as duas profundidades (Tabelas 12 e 13). Segundo a classificação proposta por Alvarez et al. (1999), os valores são muito baixo para todos esses atributos, exceto para matéria orgânica cujo valor é baixo. Os valores de pH nos Argissolos variaram de 3,58 a 4,94, na profundidade 1, apresentando valores máximos e médios inferiores aos Latossolos (Tabela 12). Por outro lado, os valores de pH nos Argissolos variaram menos ($CV\%=9,51$) que nos Latossolos ($CV\%=18,91$). Os Argissolos no Estado do Pará, geralmente são distróficos, com saturação por bases inferiores a 50%, possuem baixa fertilidade natural e valores médios de pH (H_2O) variando de 4 a 5 (FALESI, 1986).

O teor de MO dos Argissolos juntamente com o pH, independente da profundidade de avaliação, foram os atributos do solo com menor variação (Tabelas 12 e 13). Os teores mínimos nas profundidades 1 e 2 foram de 13,95 e 5,58 $g\ kg^{-1}$, enquanto que os máximos foram de 26,97 e 11,16 $g\ kg^{-1}$. Os teores médios de MO, independente da profundidade de coleta, foram inferiores aos obtidos para os Latossolos. Isto se deve provavelmente ao caráter mais argiloso dos Latossolos, principalmente na camada mais superficial (anexo 2). Solos mais argilosos proporcionam maior proteção física e química da matéria orgânica, reduzindo a sua decomposição, devido a ligações com a superfície das argilas e a oclusão física na matriz dos agregados do solo (HASSINK; WHITMORE, 1997).

Os teores médios de P disponível são baixos, independente da profundidade dos solos (Tabelas 12 e 13). Na profundidade 1 os teores de P variaram de 0,48 a 6,13 $mg\ kg^{-1}$, sendo que na profundidade 2 variação de 0,02 a 6,60 $mg\ kg^{-1}$, mostrando-se bastante variável ($CV\ 146\%$). O teor médio de P disponível na camada superficial (2,08 $mg\ kg^{-1}$) foi superior ao da camada subsuperficial (0,09 $mg\ kg^{-1}$). Araújo et al. (2004) estudando atributos químicos de Argissolo Amarelo distrófico no Estado do Acre encontraram em área de mata teor de P disponível menor que 10 $mg\ kg^{-1}$, sendo também classificados como baixo. Essa situação é bastante comum em solos amazônicos e está associada à pobreza do material de origem, e que grande parte do fósforo se encontra na biomassa vegetal (LUIZÃO, 2007). Os teores médios de P nos Argissolos foram menores do que nos Latossolos, nas duas profundidades de

amostragens. No entanto, nos Latossolos houve uma maior variação nas camadas superficiais e subsuperficiais do que nos Argissolos.

Os teores de K apresentaram alta variação nas duas profundidades, e entre estas, sendo de 0,001 a 0,121 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, os valores mínimos e máximos na profundidade 1 e de 0,001 a 0,045 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na profundidade 2, respectivamente (Tabelas 12 e 13). De acordo com Alvarez et al. (1999), esses valores enquadram nas faixas de muito baixo a médios teores, cujos valores são: muito baixo ($\leq 0,04 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), baixo (0,05-0,10 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e médio (0,11-0,18 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Os elevados teores de K observados em algumas amostras de solo pode estar relacionados a presença de minerais primários, como feldspatos, micas e clorita (MARQUES et al., 2002). Os maiores teores de K em condições de solos naturais ocorrem nos primeiros centímetros do solo, diminuindo com o aumento da profundidade (ARAÚJO et al., 2004). O teor médio de K foi de 0,024 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, na camada superficial, considerado muito baixo, enquanto Moreira e Fageria (2009) encontraram valor médio próximo 0,09 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K trocável na profundidade de 0-0,02 m, para solos do Estado do Amazonas, em diferentes ecossistemas. Os Argissolos apresentaram teores médios e máximos inferiores aos observados para os Latossolos, nas diferentes profundidades dos solos. Estes resultados podem ser justificados pelo maior teor de argila dos Latossolos, com isto apresenta maior abundância de caulinita. A caulinita mesmo sendo um mineral secundário, também representa uma importante reserva de K na fração argila (MELO et al., 2003). Uma provável fonte de formas não trocáveis de K na caulinita foi a presença de camadas de mica preservadas no interior do mineral (LEE et al., 1975; MELO et al., 2001).

Os teores médios de Ca^{+2} e Mg^{+2} e os valores de capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V) foram na profundidade 1 (0,74 e 0,21 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 4,53 e 18,82 %) superiores aos encontrados na profundidade 2 (0,12 e 0,07 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 2,81 e 6,18%), sendo ambos classificados como baixos para profundidade 1 e muito baixo para a profundidade 2 (ALVAREZ et al., 1999). No entanto foi observada uma grande variação entre os valores daquelas variáveis, cujos valores máximos foram elevados, principalmente da saturação por base, que atingiu 52%, na camada superficial, caracterizando o solo como eutrófico. Em solos do Estado do Amazonas, Moreira e Fageria (2009) observaram também uma grande variação dos teores médios de Ca^{+2} e Mg^{+2} e os valores da CTC e da V%, com o valor máximo desta última variável atingindo 74,2%.

Os Argissolos apresentaram teores médios e máximos de Ca^{+2} e Mg^{+2} e valores da CTC e da V, menores que os observados nos Latossolos, independente da profundidade de amostragem. Isto sugere que os Latossolos e Argissolos do Estado do Pará necessitam de manejo diferenciado, não só pela variação textural entre os horizontes, mas também pela variabilidade entre as características químicas determinantes da fertilidade.

Os teores de Al trocável e acidez potencial foram menores do que os observados nos Latossolos na profundidade 1, sendo que na profundidade 2, ocorreu o inverso (Tabelas 12 e 13). Para a saturação por alumínio foi observado valores mais elevados nos Argissolos, do que nos Latossolos, independente da profundidade do solo.

De acordo com Araújo (2008), a CTC da camada subsuperficial de solos intemperizados é predominantemente ocupada por Al trocável, normalmente apresenta teor superior em relação a camada superficial. Embora os Argissolos tenham apresentado teores de Al trocável não superior a $1,89 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, na profundidade 1, e de $2,47 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, na profundidade 2, foi observada saturação por alumínio de 95,73% e 98,48%, respectivamente. Estas condições demonstram dominância do complexo de troca pelo Al trocável e elevada pobreza dos solos em Ca^{2+} e Mg^{2+} , principalmente. Considerando os valores médios, a saturação por alumínio destes solos é classificada como alta (na profundidade 1) e muito alta (na profundidade 2), de acordo com Alvarez et al. (1999). Saturação por alumínio alta, em solos do Estado do Amazonas, foi observada por Moreira e Fageria (2009), em que 76,6% dos solos apresentaram valores maiores do que 50%. Nestas condições os solos apresentam caráter distrófico, causado principalmente pelo elevado grau de intemperização a que são submetidos nas regiões tropicais.

3.3.3 Demais classes (Nitossolo, Plintossolo, Neossolo, Gleissolo e Cambissolo)

Os solos Nitossolo, Plintossolo, Neossolo, Gleissolo e Cambissolo apresentaram diferenças marcantes nas características químicas em função das profundidades e do material de origem (Tabela 12 e 13). Os valores de pH variaram na profundidade 1 de 2,34, no Gleissolo, a 5,37 no Nitossolo, enquanto que na profundidade 2 os valores foram de 2,27 para o Gleissolo e de 5,11 para o Cambissolo.

Os valores médios, na profundidade 1, apresentaram a seguinte ordem: Plintossolo > Cambissolo > Nitossolo > Gleissolo > Neossolo. De acordo com a classificação de Alvarez et al., (1999) os valores médios de pH em H₂O desses solos se apresentam como muito baixos (<4,5) e baixos (4,5-5,4), o que é uma característica da maioria dos solos da Amazônia (FALESI, 1986; ARAÚJO, 2008). Nas classes de solos como Nitossolo, Neossolo e Cambissolo os valores médios de pH em H₂O na profundidade 2 foram superiores, enquanto que o inverso ocorreu com Plintossolo e Gleissolo. Marques et al. (2004) encontraram valores de pH em H₂O mais elevados nos horizontes subsuperficiais da maioria dos solos do Cerrado, em condições naturais.

Valores baixos de pH em regiões de clima tropical decorrem do forte intemperismo das rochas devido as temperaturas elevadas e precipitações abundantes que levam a lixiviação das bases, assim como os elevados teores de óxidos de ferro e alumínio nos solos que contribuem para os baixos valores de pH (LOPES et al., 2006).

Os teores de matéria orgânica apresentaram grande variação entre os solos, com valor mínimo de 15,81 g kg⁻¹, nos Plintossolos, e valor máximo de 93,00 g kg⁻¹, nos Gleissolos, na profundidade 1 (Tabela 12 e 13). Além da ciclagem de nutrientes através de processos biogeoquímicos que mantêm o teor de matéria orgânica mais estável no solo, condições especiais, tais como drenagem deficiente, alta acidez e condições edafoclimáticas típicas da região amazônica, também pode resultar em altos conteúdos de matéria orgânica (RAIJ et al., 1997). Os valores médios de MO foram mais elevados nos Cambissolos (76,26 g kg⁻¹) e mais baixos nos Nitossolos e Neossolos (20,46 g kg⁻¹), sendo considerados como médios a muito altos (ALVAREZ et al., 1999). Em todos os solos os teores de MO foram mais baixos na profundidade 2. A redução no teor de matéria orgânica da camada superficial para as subseqüentes é normal ou esperada, pois está relacionada com a maior deposição superficial dos resíduos vegetais, principalmente em áreas de matas (LOPES et al., 2006).

Todos os solos apresentaram baixos de teores de P (ALVAREZ et al., 1999), independente da textura, exceto os Gleissolos cujos valores médios de 15,58 mg kg⁻¹ e máximos de 42,77 mg kg⁻¹ (Tabelas 12 e 13). Em solos de várzea da Amazônia, sob vegetação natural, Lopes et al. (2006) constataram valores médios de P de 10,6 mg dm⁻³. Os valores mais baixos foram observados nos Plintossolos (0,87 mg kg⁻¹) seguido pelos Nitossolos (1,12 mg kg⁻¹). Valores baixos de P disponível (3 mg kg⁻¹) em Nitossolos da Amazônia, foram observados por Moraes (1998). O baixo teor de fósforo disponível tem sido considerado como o fator nutricional que mais limita o crescimento

de plantas, nos solos de terra firme da Amazônia (TUCCI, 1991). Assim sendo, para o uso adequado destes solos há necessidade do uso de adubação fosfatada.

No Gleissolo, o teor médio de K^+ em ambas as profundidades (0,16 e 0,08 $cmol_c kg^{-1}$ respectivamente) foi classificado, segundo Alvarez et al. (1999), como médio e baixo, respectivamente. Os teores médios de Ca^{+2} e Mg^{+2} , nos Gleissolos, foram superiores aos demais solos e mais elevados na profundidade 2, cujos valores na profundidade 1 foram de (5,11 e 3,14 $cmol_c kg^{-1}$, respectivamente), e na profundidade 2 de (5,48 e 3,48 $cmol_c kg^{-1}$, respectivamente). De acordo com a classificação proposta por Alvarez et al. (1999) esses teores médios se apresentam como muito alto ($> 4,0$ para Ca^{2+} e $>1,5$ para Mg^{+2}).

O Plintossolo e o Cambissolo apresentaram comportamento oposto ao observado para o Gleissolo, ou seja, os teores médios de Ca^{+2} e Mg^{+2} foram mais elevados na superfície do solo, o que pode estar relacionado à ciclagem de nutrientes efetuados pela mata nativa e a natureza do material de origem (ARAÚJO, 2008).

Com base na classificação proposta por Alvarez et al. (1999), a CTC em ambas as profundidades pode ser dividida em dois grupos, sendo o primeiro classificado como médio e baixo (4,31-8,60 $cmol_c kg^{-1}$ e $\leq 1,6$ $cmol_c kg^{-1}$) e composto pelas seguintes classes: Nitossolo, Plintossolo e Neossolo; e o segundo, sendo classificado como alta ($>15,00$ $cmol_c kg^{-1}$) e composto pelas classes (Gleissolo e Cambissolo).

O Gleissolo apresentou teor médio de Al^{+3} trocável superior na profundidade 2 (6,28 $cmol_c kg^{-1}$) o que pode estar relacionado com a complexação de formas de Al^{+3} por compostos orgânicos na superfície do solo (ARAÚJO, 2008). Para o Nitossolo e Neossolo, o Al^{+3} trocável é classificado como médio, enquanto que para o Plintossolo, é considerado alto em ambas as profundidades (ALVAREZ et al., 1999).

Considerando os valores máximos de saturação de bases de todas as classes, nota-se que dentre as amostras de solos das classes Nitossolo e Gleissolo, há aquelas que apresentam saturação de bases maior ou igual a 50%, sendo classificadas como solos eutróficos (Embrapa, 2006). As amostras de solos da classe dos Gleissolos apresentou teor médio mais elevado de V% (50,25% e 48,80%) profundidades 1 e 2 respectivamente, quando comparado as demais classes de solos, sendo classificado como médio (ALVAREZ et al., 1999).

A saturação por Al^{+3} na profundidade 2 das classes Plintossolo e Neossolo, de acordo com Alvarez et al. (1999), foi classificada como alta ($>75\%$). Para o Plintossolo, tal resultado é devido a maior contribuição do Al^{+3} trocável na CTC efetiva das

amostras de solos (ARAÚJO, 2008) e para o Neossolo tal resultado se deve aos baixíssimos teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} (valores abaixo do nível de detecção) nesses solos (Tabela 12 e 13).

3.3.4 Análise de correlação

O pH do solo teve correlação negativa significativa com Al^{+3} , H+Al e $\text{m\%}$ e positiva com $\text{V\%}$ nas duas profundidades. Segundo Moreira e Fageria (2009), com o aumento do pH do solo, há a diminuição no conteúdo de Al^{+3} e por conseguinte, diminuição da saturação por alumínio. Da mesma forma Fageria et al. (1994), relataram que em solos de várzeas do Brasil a saturação por bases foi positivamente correlacionada com pH e negativamente com H+Al .

A matéria orgânica se correlacionou positivamente com Mg^{+2} , H+Al e CTC e negativamente com $\text{m\%}$ em ambas as profundidades. Destaque deve ser dado a alta correlação positiva entre MO e H+Al ($r=0,79$, $p<0,01$), o que pode estar relacionado com a complexação de Al^{+3} por compostos orgânicos do solo (OADES et al., 1989 citado por ARAÚJO, 2008).

O P foi o atributo que apresentou um comportamento mais expressivo quanto a correlação na profundidade 2, não se correlacionando apenas com pH. Já na profundidade 1 apresentou correlação significativa somente com H+Al , CTC e $\text{m\%}$, ao nível de 5% de probabilidade.

As bases trocáveis (K^{+} , Ca^{+2} e Mg^{+2}) apresentaram correlação positiva significativa entre si nas duas profundidades, com destaque para a alta correlação entre K^{+} e Ca^{+2} ($r=0,86$, $p<0,01$) na profundidade 2. Dessa forma, essas bases também apresentaram altas correlações com CTC e $\text{V\%}$, (0,75 e 0,85) na profundidade 1 e na profundidade 2 (0,74 e 0,90), respectivamente.

O Al^{+3} apresentou correlação significativa com Mg^{+2} nas duas profundidades, com K^{+} apenas na profundidade 1 e não se correlacionou com Ca^{+2} . A alta correlação positiva encontrada entre Mg^{+2} e Al^{+3} na profundidade 2 ($r=0,71$) pode ser explicado pelo aumento no teor desses elementos em profundidade, assim como encontrado por Araújo (2008) estudando qualidade do solo em mata nativa na Amazônia ocidental.

Correlações negativas foram encontradas entre V% e m% em ambas as profundidades ($r=-0,86$; $-0,84$, $p<0,01$ respectivamente) e entre CTC, Al^{+3} e H+Al na profundidade 2, que variaram de 0,72 a 0,85.

Tabela 14 - Coeficientes de correlações entre os atributos químicos dos solos do Estado do Pará.

Atributos do Solo	pH H ₂ O	MO	P	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	CTC	V%	m%
<u>Profundidade 1^w</u>											
pH H ₂ O	1,00										
MO	-0,09	1,00									
P	-0,10	0,20	1,00								
K ⁺	-0,31*	0,26*	0,07	1,00							
Ca ⁺²	0,37**	0,36**	0,24	0,30*	1,00						
Mg ⁺²	-0,08	0,52**	0,21	0,58**	0,55**	1,00					
Al ⁺³	-0,65**	0,23	-0,01	0,43**	-0,24	0,37**	1,00				
H ⁺ +Al ⁺³	-0,49**	0,79**	0,31*	0,37**	0,05	0,53**	0,64**	1,00			
CTC	-0,16	0,69**	0,30*	0,75**	0,67**	0,85**	0,38**	0,67**	1,00		
V%	0,30*	0,18	0,13	0,66**	0,75**	0,54**	-0,10	-0,02	0,66**	1,00	
m%	-0,38**	-0,28*	-0,29*	-0,44**	-0,64**	-0,41**	0,29**	-0,08	-0,55**	-0,86**	1,00
<u>Profundidade 2^z</u>											
pH H ₂ O	1,00										
MO	-0,32*	1,00									
P	-0,10	0,31*	1,00								
K ⁺	0,08	0,08	0,27*	1,00							
Ca ⁺²	0,01	0,25	0,60**	0,86**	1,00						
Mg ⁺²	-0,34**	0,46**	0,43**	0,58**	0,64**	1,00					
Al ⁺³	-0,54**	0,42**	0,36**	0,12	0,19	0,71**	1,00				
H ⁺ +Al ⁺³	-0,50**	0,79**	0,44**	0,12	0,27	0,70**	0,85**	1,00			
CTC	-0,32*	0,66**	0,58**	0,61**	0,74**	0,90**	0,72**	0,84**	1,00		
V%	0,25*	0,07	0,41**	0,82**	0,81**	0,56**	0,07	0,08	0,53**	1,00	
m%	-0,26*	-0,28*	-0,46**	-0,57**	-0,65**	-0,41**	0,06	-0,18	-0,48**	-0,84**	1,00

^w Profundidade 1: refere-se a camada de 0-0,2 m para todas as classes de solos.^z Profundidade 2: refere-se a camada de 0,8-1,0m para a maioria das classes de solos, exceto para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos que se referem a camada de 0,4-0,6m.

** Correlação significativa a 0,01; * Correlação significativa a 0,05.

3.4 CONCLUSÃO

Os atributos químicos P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al e H+Al foram altamente variáveis nos solos do Estado do Pará. Os valores de pH e teores MO foram os atributos que apresentaram menor variação,

Os solos apresentaram valores de pH, em média, muito baixos, ou seja, acidez elevada e valores de matéria orgânica, predominantemente baixos.

A maioria das classes de solos apresentou teores baixos de P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , embora tenha apresentado teores médios de Al trocável <1, ou seja, acidez trocável média.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. A. **Qualidade do sorgo em ecossistemas de mata nativa e pastagens na região leste do acre, na amazônia ocidental**. Minas Gerais, 253p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Viçosa, 2008.

ALVAREZ V.; V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. Ed. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, 1999. Pg. 25-32.

ALVAREZ V.; V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A.S. Interpretation of soil analysis results. In **Recommendations for use of amendments and fertilizers in Minas Gerais**, 5th ed., ed. RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. Viçosa, Brazil: Soil Fertility Commission for the State of Minas Gerais. 1999. P. 25–32.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; COSCIONE, AL.R.; ANDRADE, J.C. Determinação de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis em extrato de cloreto de potássio. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. cap. 13, p. 213-224.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. cap. 9, p. 173-180.

COUTO, E.G.; STEIN, A.; KLAMT, E Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n.1. p. 129-140, 2000.

DEMATTE, J. L. I.; DEMATÊ, J. A. M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da floresta amazônica e do cerrado do brasil central. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, p. 272-286, 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2006. 306p.

FALESI, I.C. O estado atual dos conhecimentos sobre os solos da Amazônia brasileira. In: Simpósio do Trópico Úmido, I, 1984, Belém. **Anais**. Belém, EMBRAPA-CPATU, 1986. p.168 - 191.

FANNING, D.S.; KERAMIDAS, V.Z.; EL-DEŞORKY, M.A. Micas. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, p.551-634, 1989.

HASSINK, J.; WHITMORE, A.P. A model of the physical protection of organic matter in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.6, p.131-139, 1997.

LEE, S.Y.; JACKSON, M.L.; BROWN, J.L. Micaceous oclusions in kaolinite observed by ultramicrotomy and high resolution electron microscopy. **Clays Clay Miner.**, v.23, p.125-129, 1975.

LOPES, E.L.N.; FERNANDES, A.R.; GRIMALDI, C.; RUIVO, M. L.P.; RODRIGUES, T.E.; SARRAZIN, M. Características químicas de um Gleissolo sob diferentes sistemas de uso, nas margens do rio Guamá, Belém, Pará. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi – Ciências Naturais**, Belém, v. 1, n.1, p. 127-137. 2006.

LUIZAO, F.J. Ciclos de nutrientes na Amazônia: respostas às mudanças ambientais e climáticas. **Ciência e Cultura**, v. 9, n. 3, 2007.

MARQUES, J. J.; TEIXEIRA, W. G.; SCHULZE D. G.; CURI N.. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon region. **Clay Minerals** v.37p.651–661. 2002.

MARQUES, J. J.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 121, p. 31–43, 2004.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. Raleigh: North Carolina Soil Testing Division, 1953. 23 p.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A.N.; LIMA, V.C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p.807-819. 2001.

MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FONTES, M.P.F. & SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do Grupo Barreiras no

município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 22-35, 2002.

MOLIN, J.P.; MAGALHAES, R P.; FAULIN, G D. C. **Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo**. Engenharia. Agrícola, vol.26, n.2, p. 442-452, 2006.

MOREIRA, A.; FAGERIA, N.K. Soil chemical attributes of Amazonas States, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 40, p. 2912-2925. 2009.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Variation of chemical and physical soil properties and organic matter in agroecosystem of western Amazon. Piracicaba, Brazil: CENA/USP. 2002.

MORAIS, F.I.O. Respostas do cacauzeiro à aplicação de N, P e K em dois solos da Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.63-69, 1998.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. cap. 10, p. 181-188.

SANCHEZ, P. A., SALINAS J. G. Low input management technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**. V, 34. P. 279-406. 1981.

SOUZA, Z. M. de; ALVES, M. C. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 27-34, 2003.

SOUZA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 206-274.

TUCCI, C.A.F. **Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia**. 1991. 142p. Tese (Doutorado em Solos Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade I das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará.

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹								pH 7,0		
	-----cmol _c kg ⁻¹ -----												
Latossolo													
1	3,63	24,18	4,01	0,050	0,37	0,14	1,28	5,18	0,56	1,84	5,74	9,78	69,51
2	3,47	20,46	6,27	0,024	0,11	0,06	1,26	5,16	0,19	1,45	5,35	3,63	86,64
3	3,43	23,25	9,70	0,029	0,03	0,04	1,50	5,60	0,10	1,60	5,70	1,80	93,58
7	4,15	22,32	1,19	0,029	1,09	0,22	0,42	3,42	1,34	1,76	4,76	28,18	23,84
8	4,30	18,6	1,26	0,040	1,09	0,28	0,49	3,20	1,41	1,90	4,61	30,61	25,76
9	4,29	18,6	1,67	0,040	0,97	0,21	0,46	2,84	1,22	1,68	4,06	30,07	27,36
13	3,98	27,9	0,64	0,070	0,78	0,45	0,94	4,52	1,30	2,24	5,82	22,36	41,94
14	3,91	27,9	1,26	0,086	0,52	0,40	1,12	4,44	1,01	2,13	5,45	18,56	52,53
15	3,88	26,04	1,05	0,096	0,70	0,43	0,98	4,92	1,22	2,20	6,14	19,90	44,50
19	3,44	11,16	2,50	0,050	0,16	0,13	1,53	5,48	0,34	1,87	5,82	5,84	81,84
20	3,53	25,11	2,50	0,055	0,08	0,12	1,56	5,68	0,26	1,82	5,94	4,42	85,60
21	3,39	33,48	2,84	0,081	0,14	0,27	2,44	9,06	0,49	2,93	9,55	5,18	83,15
25	3,25	31,62	5,38	0,152	0,13	0,21	3,17	7,14	0,49	3,66	7,63	6,46	86,53
26	3,27	30,69	6,07	0,157	0,03	0,15	3,60	8,72	0,34	3,94	9,06	3,72	91,44
27	3,26	32,55	3,53	0,157	0,10	0,18	3,97	8,24	0,44	4,41	8,68	5,04	90,08
31	3,26	25,11	2,77	0,157	0,01	0,16	3,43	7,38	0,34	3,77	7,72	4,35	91,10
32	3,30	30,69	3,73	0,193	0,18	0,24	3,49	0,85	0,62	4,11	1,47	42,00	84,98
33	3,32	27,9	2,91	0,168	0,02	0,16	4,11	8,14	0,35	4,46	8,49	4,08	92,23
37	5,40	17,67	1,19	0,132	4,70	0,64	0,14	1,60	5,47	5,61	7,07	77,37	2,50
38	5,41	18,6	3,25	0,147	5,36	0,71	0,09	1,28	6,22	6,31	7,50	82,94	1,43

APÊNDICE A - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 1 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				emol _c kg ⁻¹					%	
39	5,43	17,67	1,26	0,132	5,37	0,72	0,16	1,68	6,22	6,38	7,90	78,74	2,51
43	4,14	27,9	0,85	0,101	1,32	0,45	0,63	5,86	1,88	2,51	7,74	24,26	25,13
44	4,00	27,9	0,99	0,096	1,07	0,35	0,61	5,72	1,52	2,13	7,24	20,97	28,67
45	4,00	29,76	0,64	0,091	1,95	0,36	0,52	5,94	2,40	2,92	8,34	28,81	17,79
97	4,71	30,69	9,91	0,055	6,06	0,57	0,12	5,46	6,69	6,81	12,15	55,05	1,76
98	4,64	30,69	14,03	0,045	4,74	0,61	0,24	5,72	5,40	5,64	11,12	48,56	4,26
99	4,57	24,18	16,16	0,045	3,43	0,57	0,27	5,16	4,05	4,32	9,21	43,95	6,26
127	4,54	28,83	103,60	0,006	4,37	0,83	0,09	8,08	5,21	5,30	13,29	39,20	1,70
128	4,01	29,76	103,99	0,006	4,25	0,02	0,14	8,06	4,28	4,42	12,34	34,67	3,17
129	4,45	26,97	103,93	0,005	4,31	0,04	0,14	4,90	4,36	4,50	9,26	47,06	3,11
151	4,16	15,81	2,16	0,002	0,03	0,03	0,73	2,32	0,06	0,79	2,38	2,58	92,24
152	4,19	13,95	2,03	0,002	0,20	0,07	0,57	2,16	0,28	0,85	2,44	11,40	67,22
153	4,04	13,02	1,13	0,001	0,02	0,03	0,68	2,18	0,05	0,73	2,23	2,37	92,77
157	3,84	33,48	0,93	0,014	0,69	0,19	1,46	6,98	0,90	2,36	7,88	11,44	61,82
158	3,92	39,06	1,13	0,016	1,31	0,40	1,41	7,26	1,73	3,14	8,99	19,23	44,93
159	4,03	29,76	0,93	0,011	0,51	0,23	1,62	4,60	0,76	2,38	5,36	14,10	68,21
163	3,85	22,32	1,45	0,005	0,18	0,11	1,23	3,98	0,30	1,53	4,28	6,95	80,53
164	3,73	19,53	0,93	0,006	0,15	0,09	1,04	4,04	0,24	1,28	4,28	5,66	81,09
165	3,82	22,32	0,93	0,008	0,27	0,12	1,20	4,72	0,40	1,60	5,12	7,75	75,16
169	3,86	16,74	0,93	0,004	0,12	0,02	0,86	0,64	0,15	1,01	0,79	18,60	85,47
170	3,67	20,46	2,09	0,005	0,07	0,11	1,28	4,32	0,19	1,47	4,51	4,22	87,06

APÊNDICE A - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 1 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹									
171	3,74	19,53	1,77	0,005	0,17	0,06	0,96	3,64	0,24	1,20	3,88	6,08	80,30
181	4,17	19,53	5,05	0,005	1,10	0,14	0,48	3,54	1,25	1,73	4,79	26,04	27,81
182	4,22	18,6	5,50	0,005	1,25	0,16	0,46	3,58	1,41	1,87	4,99	28,33	24,53
183	4,26	19,53	5,57	0,005	1,37	0,18	0,46	3,48	1,55	2,01	5,03	30,88	22,83
199	5,51	44,64	6,28	0,016	13,20	1,86	0,06	2,96	15,08	15,14	18,04	83,59	0,40
200	5,72	46,5	7,56	0,016	13,65	1,90	0,04	3,58	15,57	15,61	19,15	81,31	0,26
201	5,71	42,78	6,28	0,016	12,25	1,66	0,04	2,34	13,93	13,97	16,27	85,62	0,29
205	5,22	17,67	1,71	0,006	1,20	0,14	0,42	2,08	1,35	1,77	3,43	39,32	23,76
206	5,03	16,74	1,26	0,013	0,42	0,10	1,10	2,94	0,53	1,63	3,47	15,38	67,31
207	5,58	15,81	1,32	0,019	0,80	0,30	0,59	1,80	1,12	1,71	2,92	38,36	34,50
211	5,41	22,32	0,55	0,011	0,17	0,30	0,73	3,92	0,48	1,21	4,40	10,99	60,14
212	5,26	20,46	0,42	0,017	0,32	0,26	0,84	3,50	0,60	1,44	4,10	14,70	58,20
213	5,26	23,25	0,74	0,014	0,17	0,27	0,71	4,22	0,45	1,16	4,67	9,72	60,99
217	5,51	21,39	1,58	0,023	0,14	0,22	0,43	3,34	0,38	0,81	3,72	10,12	53,35
218	5,54	26,04	2,09	0,017	0,48	0,37	0,54	3,58	0,86	1,40	4,44	19,45	38,45
219	5,67	18,6	1,83	0,020	0,72	0,36	0,27	2,56	1,10	1,37	3,66	30,05	19,71
223	5,42	32,55	2,22	0,025	0,96	0,73	0,53	4,68	1,72	2,25	6,40	26,90	23,53
224	5,64	27,9	1,64	0,036	0,30	0,36	0,55	3,88	0,69	1,24	4,57	15,13	44,30
225	5,41	13,02	1,45	0,009	0,03	0,04	0,50	1,96	0,08	0,58	2,04	3,99	86,00
229	4,80	27,9	2,22	0,020	0,23	0,35	1,55	6,82	0,60	2,15	7,42	8,07	72,13
230	5,00	26,04	1,96	0,018	0,23	0,45	1,07	6,02	0,70	1,77	6,72	10,40	60,49

APÊNDICE A - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade I das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m	
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				-----cmol _c kg ⁻¹ -----							-----%-----
231	5,31	28,83	1,19	0,020	0,20	0,32	1,33	5,44	0,53	1,86	5,97	8,88	71,49	
235	6,36	28,83	2,29	0,001	5,19	0,02	0,11	2,20	5,22	5,33	7,42	70,33	2,07	
236	5,87	26,97	3,51	0,002	7,44	1,62	0,08	2,80	9,06	9,14	11,86	76,40	0,87	
237	5,70	19,53	0,93	0,001	5,19	1,64	0,25	2,44	6,83	7,08	9,27	73,67	3,53	
253	3,84	26,04	2,67	0,015	0,13	0,07	1,48	4,92	0,21	1,69	5,13	4,16	87,40	
254	3,83	26,97	2,03	0,016	0,26	0,07	1,45	4,52	0,34	1,79	4,86	7,08	80,81	
255	3,83	26,04	3,32	0,017	0,13	0,27	1,53	4,50	0,42	1,95	4,92	8,45	78,65	
Argissolo														
49	3,58	25,11	1,74	0,029	-	0,03	1,39	5,74	0,06	1,45	5,80	1,07	95,73	
50	3,62	26,97	1,81	0,024	-	0,05	1,42	5,72	0,07	1,49	5,79	1,27	95,08	
51	3,60	26,04	2,43	0,029	-	0,04	1,44	5,38	0,07	1,51	5,45	1,35	95,15	
55	4,32	20,46	0,78	0,019	0,57	0,14	0,66	3,66	0,72	1,38	4,38	16,53	47,66	
56	4,30	16,74	1,40	0,029	0,70	0,25	0,32	2,96	0,98	1,30	3,94	24,88	24,60	
57	4,30	19,53	1,19	0,024	0,24	0,12	0,59	3,26	0,38	0,97	3,64	10,38	60,98	
61	4,43	17,67	3,87	0,040	1,06	0,28	0,33	2,98	1,38	1,71	4,36	31,62	19,32	
62	4,55	17,67	1,40	0,035	1,55	0,35	0,17	3,10	1,93	2,10	5,03	38,42	8,08	
63	4,51	17,67	1,74	0,040	1,57	0,35	0,17	2,64	1,97	2,14	4,61	42,69	7,96	
67	3,71	13,95	2,84	0,019	-	0,02	0,72	3,26	0,04	0,76	3,30	1,32	94,29	
68	3,71	13,95	3,87	0,024	-	0,02	0,77	6,38	0,04	0,81	6,42	0,69	94,56	
69	3,70	13,95	6,13	0,019	-	0,02	0,76	3,38	0,04	0,80	3,42	1,05	95,47	
73	3,94	18,6	4,90	0,106	0,47	0,20	0,78	6,78	0,78	1,56	7,56	10,33	49,96	

APÊNDICE A - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 1 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				-----cmol _c kg ⁻¹ -----						
74	4,17	18,6	2,08	0,116	1,15	0,30	0,41	3,08	1,57	1,98	4,65	33,80	20,68
75	4,31	17,67	3,25	0,121	0,83	0,26	0,63	3,50	1,21	1,84	4,71	25,68	34,25
139	4,34	18,6	1,83	0,014	0,36	0,11	0,70	2,94	0,49	1,19	3,43	14,26	58,87
140	3,97	22,32	1,13	0,005	0,36	0,08	0,88	4,36	0,44	1,32	4,80	9,19	66,61
141	4,05	21,39	0,93	0,003	0,20	0,08	1,10	4,00	0,28	1,38	4,28	6,60	79,57
145	4,51	16,74	1,71	0,003	0,75	0,17	0,31	1,72	0,92	1,23	2,64	34,86	25,20
146	4,45	17,67	1,45	0,002	0,60	0,14	0,39	2,46	0,75	1,14	3,21	23,29	34,31
147	4,29	15,81	1,19	0,001	0,19	0,05	0,61	2,52	0,24	0,85	2,76	8,62	71,96
175	4,53	17,67	1,96	0,017	2,02	0,71	0,26	2,50	2,75	3,01	5,25	52,40	8,63
176	4,68	18,6	1,83	0,015	1,64	0,58	0,39	2,86	2,23	2,62	5,09	43,78	14,90
177	4,60	18,6	2,09	0,016	1,51	0,52	0,35	2,44	2,05	2,40	4,49	45,67	14,58
187	3,94	17,67	3,19	0,014	1,41	0,38	1,11	3,88	1,80	2,91	5,68	31,70	38,13
188	3,92	17,67	3,12	0,014	1,32	0,38	0,98	3,56	1,71	2,69	5,27	32,40	36,48
189	3,96	15,81	3,12	0,013	1,25	0,38	1,15	3,66	1,64	2,79	5,30	31,00	41,15
241	4,77	13,95	0,80	0,004	0,47	0,30	0,63	2,68	0,77	1,40	3,45	22,37	44,93
242	4,31	18,6	0,48	0,008	0,38	0,13	0,90	2,30	0,52	1,42	2,82	18,30	63,60
243	4,77	23,25	1,38	0,012	0,42	0,17	0,82	3,44	0,61	1,43	4,05	15,01	57,44
247	4,94	17,67	1,32	0,006	0,01	0,07	0,74	3,04	0,09	0,83	3,13	2,82	89,34
248	4,58	15,81	1,00	0,004	0,87	0,25	1,12	3,16	1,12	2,24	4,28	26,17	50,00
249	4,30	16,74	2,35	0,012	0,09	0,13	1,36	3,22	0,23	1,59	3,45	6,73	85,40
259	3,61	25,11	1,71	0,011	0,09	0,13	1,87	5,22	0,23	2,10	5,45	4,24	89,00

APÊNDICE A - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 1 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K	Ca	Mg	Al	H+Al cmol _c kg ⁻¹	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
260	3,63	26,04	1,58	0,012	0,05	0,03	1,89	5,26	0,10	1,99	5,36	1,84	95,03
261	3,61	25,11	1,38	0,010	0,02	0,25	1,88	5,36	0,29	2,17	5,65	5,09	86,73
79	4,81	21,39	1,05	0,091	4,12	1,33	0,08	2,88	5,54	5,62	8,42	65,81	1,42
80	5,08	19,53	0,85	0,086	5,47	1,21	0,10	2,72	6,77	6,87	9,49	71,33	1,46
81	5,37	18,6	0,23	0,070	7,67	1,42	0,07	2,12	9,16	9,23	11,28	81,21	0,76
193	4,07	20,46	2,80	0,010	0,09	0,19	1,38	5,38	0,29	1,67	5,67	5,06	82,79
194	3,94	20,46	0,80	0,010	0,09	0,19	1,62	5,44	0,28	1,90	5,72	4,94	85,15
195	3,49	22,32	1,00	0,010	0,07	0,17	1,44	5,60	0,25	1,69	5,85	4,28	85,18
85	4,90	32,55	1,33	0,040	1,61	0,30	0,97	5,86	1,96	2,93	7,82	25,02	33,16
86	4,81	39,06	0,99	0,035	0,14	0,07	1,91	8,96	0,24	2,15	9,20	2,63	88,76
87	4,58	15,81	0,30	0,019	0,06	0,03	0,94	3,06	0,11	1,05	3,17	3,48	89,49
91	3,59	20,46	2,08	0,019	-	-	1,06	3,90	0,02	1,08	3,92	0,49	98,22
92	3,56	22,32	1,81	0,019	-	-	0,92	3,52	0,02	0,94	3,54	0,54	97,96
93	3,60	18,6	2,08	0,024	-	-	0,96	3,68	0,02	0,98	3,70	0,66	97,53
103	4,05	24,18	9,70	0,137	2,33	3,12	2,20	6,24	5,59	7,79	11,83	47,24	28,25
104	3,81	24,18	8,74	0,116	2,43	3,01	3,54	8,08	5,55	9,09	13,63	40,73	38,93
105	3,80	26,97	7,51	0,127	2,24	3,12	4,10	8,48	5,49	9,59	13,97	39,29	42,76

APÊNDICE A - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 1 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m	
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹										%
109	4,65	16,74	7,03	0,152	11,53	2,15	0,51	3,20	13,83	14,34	17,03	81,21	3,56	
110	4,60	17,67	5,79	0,203	10,45	1,95	0,97	3,26	12,61	13,58	15,87	79,45	7,14	
111	4,43	18,6	6,41	0,168	10,99	2,05	0,71	4,06	13,21	13,92	17,27	76,49	5,10	
115	2,34	55,8	19,93	0,024	2,62	3,58	10,79	19,88	6,23	17,02	26,11	23,86	63,40	
116	3,18	51,15	15,81	0,127	3,21	3,73	3,52	14,82	7,08	10,60	21,90	32,32	33,22	
117	3,03	26,97	21,51	0,183	2,03	3,43	3,22	9,38	5,64	8,86	15,02	37,56	36,33	
121	3,58	37,2	35,05	0,127	4,49	3,85	0,86	5,94	8,47	9,33	14,41	58,78	9,22	
122	3,49	93	42,77	0,352	4,12	3,74	1,46	16,86	8,21	9,67	25,07	32,75	15,10	
123	3,05	38,13	6,73	0,162	4,87	3,96	1,49	7,88	8,99	10,48	16,87	53,29	14,22	
							Cambissolo							
133	4,84	78,12	2,93	0,024	5,20	1,06	0,17	10,92	6,29	6,46	17,21	36,54	2,63	
134	4,70	81,84	2,99	0,014	5,81	1,01	0,59	13,42	6,83	7,42	20,25	33,72	7,95	
135	4,56	68,82	1,90	0,025	4,20	1,04	0,63	14,88	5,26	5,89	20,14	26,11	10,70	

Cambissolo

APÊNDICE B - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 2 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará.

AMOSTRAS	pH	M.O g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTCef	CTC pH 7,0	V	m													
														H ₂ O	-----cmol _c kg ⁻¹ -----											
															Latossolo											
4	4,07	11,16	-	0,004	-	0,03	0,78	2,48	0,03	0,81	2,51	1,35	95,84													
5	4,12	11,16	0,09	0,004	-	0,02	0,75	2,48	0,03	0,78	2,51	1,11	96,42													
6	4,10	12,09	0,44	0,009	-	0,05	1,01	2,64	0,05	1,06	2,69	2,01	94,91													
10	4,25	10,23	-	0,009	0,66	0,10	0,80	1,92	0,76	1,56	2,68	28,45	51,17													
11	4,25	10,23	-	0,004	0,02	0,12	0,75	1,84	0,15	0,90	1,99	7,37	83,67													
12	4,77	10,23	-	0,004	1,29	0,19	0,16	1,50	1,49	1,65	2,99	49,83	9,70													
16	4,55	48,36	0,09	0,009	0,04	0,42	0,38	2,38	0,47	0,85	2,85	16,37	44,92													
17	4,51	11,16	-	0,009	0,12	0,37	0,48	2,40	0,50	0,98	2,90	17,38	48,73													
18	4,57	11,16	-	0,009	0,21	0,32	0,36	2,38	0,54	0,90	2,92	18,60	39,83													
22	3,85	13,02	6,07	0,014	-	0,05	1,26	3,22	0,06	1,32	3,28	1,95	95,15													
23	3,79	12,09	0,57	0,009	-	0,02	1,16	3,06	0,03	1,19	3,09	1,03	97,33													
24	3,94	13,95	0,02	0,019	-	0,09	1,28	4,04	0,11	1,39	4,15	2,64	92,12													
28	4,16	9,3	0,09	0,029	-	-	1,81	2,32	0,03	1,84	2,35	1,25	98,40													
29	4,19	9,3	3,53	0,024	-	-	1,82	2,30	0,02	1,84	2,32	1,05	98,68													
30	4,06	9,3	3,11	0,024	-	-	1,81	2,22	0,02	1,83	2,24	1,08	98,68													
34	3,84	11,16	0,37	0,050	-	0,03	2,31	4,26	0,08	2,39	4,34	1,90	96,56													
35	3,94	9,3	2,43	0,050	-	0,03	1,95	3,30	0,08	2,03	3,38	2,28	96,20													
36	3,90	9,3	2,22	0,060	-	0,04	1,93	3,22	0,10	2,03	3,32	2,95	95,17													
40	5,98	11,16	3,39	0,121	4,89	0,64	0,09	0,98	5,65	5,74	6,63	85,22	1,57													

APÊNDICE B - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 2 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹									
41	5,98	10,23	-	0,116	4,66	0,61	0,09	1,26	5,38	5,47	6,64	81,03	1,64
42	6,10	10,23	-	0,127	5,12	0,66	0,07	1,04	5,91	5,98	6,95	85,05	1,17
46	4,43	13,95	-	0,014	-	0,07	0,25	3,36	0,09	0,34	3,45	2,51	74,32
47	4,33	12,09	1,81	0,009	-	0,03	0,33	3,52	0,04	0,37	3,56	1,09	89,46
48	4,44	12,09	0,44	0,009	-	0,05	0,13	3,14	0,06	0,19	3,20	1,88	68,39
100	5,05	15,81	16,02	0,009	3,21	0,24	0,17	3,36	3,45	3,62	6,81	50,70	4,69
101	4,84	11,16	7,71	0,004	2,32	0,23	0,26	2,88	2,55	2,81	5,43	46,97	9,25
102	4,86	8,37	11,76	0,009	1,42	0,22	0,28	2,26	1,65	1,93	3,91	42,19	14,51
130	4,01	13,02	1,26	-	0,18	0,04	0,09	6,80	0,23	0,32	7,03	3,22	28,48
131	4,11	13,95	1,90	-	0,20	0,03	0,17	6,84	0,22	0,39	7,06	3,16	43,21
132	3,91	12,09	1,26	0,001	0,18	0,04	0,15	3,72	0,22	0,37	3,94	5,56	40,67
154	4,52	9,3	0,16	-	0,42	0,05	0,43	1,86	0,46	0,89	2,32	19,97	48,09
155	4,64	9,3	0,29	-	0,25	0,05	0,33	1,46	0,30	0,63	1,76	17,00	52,47
156	4,49	9,3	0,29	-	0,01	0,01	0,38	1,72	0,02	0,40	1,74	0,89	96,09
160	4,31	12,09	0,29	-	0,16	0,03	1,12	3,26	0,18	1,30	3,44	5,35	85,87
161	4,52	13,95	0,16	0,002	1,40	0,29	0,80	3,74	1,70	2,50	5,44	31,19	32,06
162	4,30	12,09	0,03	0,001	0,14	0,06	1,03	3,30	0,20	1,23	3,50	5,59	84,05
166	4,33	10,23	0,29	-	-	0,02	0,82	2,50	0,02	0,84	2,52	0,99	97,05
167	4,41	9,3	0,03	-	0,26	0,03	1,09	2,60	0,28	1,37	2,88	9,86	79,31
168	4,33	9,3	0,29	-	0,18	0,10	0,78	2,52	0,28	1,06	2,80	9,92	73,76

APÊNDICE B - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 2 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				cmol _c kg ⁻¹						
172	4,08	8,37	0,16	-	-	-	0,70	2,06	0,00	0,70	2,06	0,00	100,00
173	3,99	9,3	0,10	-	-	-	0,97	1,96	0,00	0,97	1,96	0,00	100,00
174	4,16	9,3	0,03	-	-	-	1,02	1,88	0,00	1,02	1,88	0,00	100,00
184	4,51	11,16	6,60	-	0,09	-	0,24	2,56	0,09	0,33	2,65	3,24	73,70
185	4,36	12,09	7,50	-	-	-	0,29	2,62	0,00	0,29	2,62	0,00	100,00
186	4,45	12,09	8,34	-	-	-	0,34	2,66	0,00	0,34	2,66	0,00	100,00
202	5,33	14,88	26,94	0,003	2,93	0,29	0,03	3,40	3,22	3,25	6,62	48,63	0,92
203	5,14	15,81	25,91	0,002	2,30	0,27	0,05	2,42	2,57	2,62	4,99	51,53	1,91
204	5,04	14,88	28,29	0,002	2,27	0,27	0,10	3,52	2,54	2,64	6,06	41,95	3,78
208	5,50	8,37	0,03	-	0,05	0,09	0,28	1,38	0,13	0,41	1,51	8,87	67,57
209	5,50	9,3	0,10	-	0,06	0,08	0,30	1,60	0,14	0,44	1,74	7,81	68,88
210	5,38	8,37	0,23	-	0,05	0,08	0,29	1,30	0,13	0,42	1,43	9,41	68,24
214	5,37	13,95	0,29	0,003	-	0,04	0,81	1,90	0,05	0,86	1,95	2,37	94,62
215	5,34	13,95	0,16	0,003	0,10	0,05	0,79	1,68	0,16	0,95	1,84	8,46	83,57
216	5,31	13,95	0,10	0,002	0,05	0,04	0,75	2,18	0,10	0,85	2,28	4,28	88,51
220	5,18	9,3	0,16	0,003	0,01	0,02	0,27	1,50	0,04	0,31	1,54	2,36	88,17
221	5,25	10,23	0,03	0,001	0,01	0,01	0,54	1,34	0,02	0,56	1,36	1,79	95,68
222	5,39	9,3	0,16	0,002	-	0,01	0,38	1,28	0,02	0,40	1,30	1,19	96,12
226	5,28	9,3	0,35	0,010	0,47	0,24	0,60	1,48	0,72	1,32	2,20	32,81	45,36
227	5,32	10,23	0,16	0,008	0,02	0,09	0,55	2,26	0,11	0,66	2,37	4,82	82,78

APÊNDICE B - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 2 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹									
228	5,32	8,37	0,29	0,001	-	0,01	0,80	1,52	0,01	0,81	1,53	0,44	99,17
232	4,99	9,3	0,10	-	0,19	0,32	1,56	2,62	0,52	2,08	3,14	16,52	75,06
233	5,47	7,44	0,10	-	-	0,10	1,53	2,18	0,10	1,63	2,28	4,31	93,97
234	5,08	9,3	0,10	0,001	-	0,17	1,58	1,50	0,17	1,75	1,67	10,21	90,25
238	5,44	8,37	0,16	0,030	3,39	1,51	1,10	2,08	4,93	6,03	7,01	70,32	18,24
239	5,53	7,44	0,35	0,042	0,49	0,81	0,77	2,08	1,35	2,12	3,43	39,29	36,39
240	5,13	9,3	0,10	0,010	0,58	0,62	0,61	2,38	1,21	1,82	3,59	33,72	33,50
256	4,84	5,58	1,45	0,001	0,23	0,28	1,40	2,26	0,51	1,91	2,77	18,40	73,31
257	4,94	6,51	1,51	0,002	0,23	0,23	1,50	2,06	0,46	1,96	2,52	18,20	76,60
258	4,74	4,65	1,38	0,001	0,24	0,13	1,50	1,66	0,37	1,87	2,03	18,06	80,39
Argissolo													
52	4,23	8,37	2,43	0,004	-	0,03	0,77	3,12	0,04	0,81	3,16	1,12	95,60
53	4,24	7,44	2,32	0,004	-	0,02	0,63	2,94	0,02	0,65	2,96	0,84	96,21
54	4,12	7,44	2,22	0,004	-	0,04	0,70	2,90	0,04	0,74	2,94	1,37	94,55
58	4,50	9,3	-	0,004	0,02	0,03	0,56	2,44	0,05	0,61	2,49	2,11	91,41
59	4,61	11,16	-	0,004	0,22	0,05	0,53	2,52	0,27	0,80	2,79	9,75	66,06
60	4,39	11,16	-	0,004	0,12	0,04	0,78	2,50	0,16	0,94	2,66	6,10	82,76
64	4,28	8,37	1,02	0,009	0,10	0,04	0,75	2,46	0,14	0,89	2,60	5,38	84,28
65	4,36	9,3	0,09	0,004	0,12	0,06	0,77	2,70	0,18	0,95	2,88	6,24	81,07
66	4,46	9,3	2,91	0,004	0,15	0,07	0,67	2,54	0,22	0,89	2,76	8,13	74,88

APÊNDICE B - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 2 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				cmol _c kg ⁻¹					%	
70	3,98	10,23	1,95	0,009	-	-	0,58	1,48	0,01	0,59	1,49	0,60	98,48
71	3,97	10,23	0,37	0,004	-	-	0,69	2,12	0,00	0,69	2,12	0,18	99,45
72	3,99	10,23	0,30	0,004	-	-	0,58	2,68	0,00	0,58	2,68	0,14	99,34
76	4,20	11,16	0,02	0,029	0,22	0,11	1,28	4,32	0,36	1,64	4,68	7,61	78,25
77	4,25	9,3	0,30	0,045	0,18	0,14	1,02	3,62	0,37	1,39	3,99	9,32	73,28
78	4,26	10,23	0,23	0,024	0,20	0,13	0,92	3,68	0,35	1,27	4,03	8,71	72,38
142	3,89	9,3	0,42	-	-	0,01	0,54	1,38	0,01	0,55	1,39	0,90	97,73
143	4,29	9,3	0,29	-	0,02	0,01	0,70	2,30	0,02	0,72	2,32	1,04	96,65
144	4,27	8,37	0,29	-	0,06	0,01	0,68	1,90	0,06	0,74	1,96	3,20	91,53
148	4,49	10,23	0,29	-	0,14	0,02	0,72	2,08	0,16	0,88	2,24	7,20	81,69
149	4,42	10,23	0,16	-	0,05	0,07	0,75	1,78	0,11	0,86	1,89	5,87	87,10
150	4,53	9,3	0,16	-	0,08	0,01	0,66	1,80	0,09	0,75	1,89	4,93	87,61
178	4,22	9,3	0,55	0,005	0,21	0,14	1,22	2,72	0,36	1,58	3,08	11,67	77,25
179	4,18	9,3	6,60	0,005	0,29	0,15	1,10	2,74	0,44	1,54	3,18	13,76	71,55
180	4,14	9,3	2,03	0,005	0,19	0,13	1,02	2,62	0,33	1,35	2,95	11,09	75,73
190	4,11	10,23	0,87	0,005	0,19	0,06	2,47	3,80	0,25	2,72	4,05	6,14	90,85
191	4,06	9,3	0,87	0,006	0,14	0,06	2,31	3,90	0,20	2,51	4,10	4,93	91,96
192	4,06	10,23	0,87	0,006	0,15	0,06	2,38	4,28	0,21	2,59	4,49	4,68	91,89
244	4,76	8,37	0,10	0,001	0,14	0,22	1,06	1,52	0,35	1,41	1,87	18,80	75,08
245	4,82	9,3	0,16	0,002	0,04	0,02	1,08	2,44	0,07	1,15	2,51	2,73	94,04

APÊNDICE B - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 2 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				cmol _c kg ⁻¹					%	
246	4,96	9,3	0,23	0,001	0,05	0,12	2,43	3,04	0,16	2,59	3,20	5,10	93,70
250	5,11	8,37	0,23	0,006	0,17	0,14	1,25	2,26	0,32	1,57	2,58	12,28	79,80
251	4,92	9,3	0,29	0,000	0,04	0,14	1,21	2,16	0,17	1,38	2,33	7,45	87,43
252	4,84	9,3	0,16	0,001	0,04	0,08	1,06	1,68	0,12	1,18	1,80	6,57	89,97
262	4,84	6,51	0,35	0,001	0,10	0,13	1,85	2,66	0,23	2,08	2,89	8,02	88,86
263	4,94	7,44	0,29	0,002	0,01	0,13	1,86	2,46	0,14	2,00	2,60	5,27	93,14
264	4,74	5,58	0,23	0,001	0,00	0,03	1,87	2,66	0,03	1,90	2,69	1,25	98,23
Nitossolo													
82	4,89	9,3	-	0,014	2,85	1,61	0,13	2,88	4,47	4,60	7,35	60,82	2,83
83	4,90	10,23	1,95	0,019	1,87	1,38	0,11	2,62	3,27	3,38	5,89	55,53	3,25
84	4,88	8,37	0,99	0,014	3,83	1,83	0,09	2,08	5,67	5,76	7,75	73,18	1,56
196	4,24	11,16	1,64	-	-	0,14	0,50	3,38	0,14	0,64	3,52	3,88	78,58
197	4,28	9,3	1,58	-	-	0,12	0,62	3,16	0,12	0,74	3,28	3,66	83,78
198	4,26	11,16	1,45	-	0,17	0,14	0,57	2,78	0,31	0,88	3,09	9,93	65,03
Plintossolo													
88	4,52	7,44	0,51	0,019	-	-	0,99	2,18	0,02	1,01	2,20	0,87	98,10
89	4,56	10,23	2,50	0,009	0,01	0,02	1,88	3,56	0,04	1,92	3,60	1,08	97,97
90	4,84	8,37	-	0,004	0,05	0,04	0,52	1,82	0,09	0,61	1,91	4,68	85,34
Neossolo													
94	4,36	10,23	5,52	0,004	-	-	0,45	2,82	0,00	0,45	2,82	0,14	99,15

APÊNDICE B - Resultados analíticos dos atributos químicos na profundidade 2 das diferentes classes de solos naturais do Estado do Pará. (continuação...)

AMOSTRAS	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC ef	CTC pH 7,0	V	m
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----cmolc kg ⁻¹ -----									
95	4,06	9,3	1,67	0,004	-	-	0,74	2,32	0,00	0,74	2,32	0,17	99,48
96	4,14	10,23	7,92	0,004	-	-	0,42	2,76	0,00	0,42	2,76	0,14	99,09
106	4,63	10,23	0,71	0,081	2,69	3,87	1,96	4,82	6,64	8,60	11,46	57,93	22,80
107	4,16	9,3	1,33	0,116	2,70	3,69	3,43	5,90	6,51	9,94	12,41	52,45	34,51
108	4,01	10,23	2,08	0,116	3,21	3,79	3,63	6,20	7,11	10,74	13,31	53,42	33,80
112	4,77	11,16	4,62	0,142	11,77	2,54	0,71	3,04	14,45	15,16	17,49	82,62	4,68
113	4,88	13,02	6,96	0,157	11,65	2,43	0,35	2,78	14,24	14,59	17,02	83,67	2,40
114	4,65	13,95	42,72	0,157	11,71	2,49	0,54	3,58	14,35	14,89	17,93	80,04	3,63
118	2,27	41,85	28,65	0,019	3,77	4,07	23,34	33,84	7,86	31,20	41,70	18,85	74,81
119	2,70	26,97	3,66	0,029	2,69	3,73	10,72	19,76	6,45	17,17	26,21	24,60	62,44
120	2,59	27,9	21,72	0,035	2,85	3,80	9,80	15,16	6,69	16,49	21,85	30,62	59,43
124	2,46	60,45	12,65	0,041	3,94	3,81	8,15	17,76	7,79	15,94	25,55	30,49	51,13
125	2,55	93	10,72	0,044	4,44	3,76	7,06	23,32	8,24	15,30	31,56	26,11	46,14
126	2,38	47,43	2,48	0,042	4,31	3,85	5,71	10,08	8,20	13,91	18,28	44,86	41,04
136	5,02	87,42	2,48	0,019	1,72	0,34	0,33	16,12	2,08	2,41	18,20	11,41	13,71
137	5,11	55,8	6,79	0,010	1,44	0,25	0,55	12,44	1,70	2,25	14,14	12,03	24,44
138	4,74	66,96	7,31	0,011	1,73	0,49	0,90	13,16	2,23	3,13	15,39	14,48	28,78

Cambissolo

ANEXO

Anexo A - Valores de referência de metais pesados em solos (mg kg⁻¹) proposto por diversos autores, obtidos por diferentes métodos.

	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
NE Espanha ¹	1762	-	275	145	83	91	326
Catalonia ²	669	2	103	206	94	92	239
N Inglaterra ³	492	-	92,5	39,2	26	100	112,2
USA ⁴	-	0,34	-	30	27,1	15	75,8
Nanjing ⁵	-	-	59,0 ± 20	32,2 ± 13	-	24,8 ± 16,3	78,6 ± 29,5
China ⁵	-	0,4	53,9	22	23,4	26,3	100
Catalonia ⁶	-	0,261	21,6	15,4	20,7	21,7	56,1
Catalonia ^{vr6}	-	0,57	71	43,3	49,6	55,5	95,3
Warsaw ⁷	-	1	12,9	-	-	-	-
NW China ⁸	469	-	61	22,6	26,9	26	74,2
Guangdong ⁹	-	0,10 ± 0,259	57,8 ± 48,9	18 ± 17,1	18,0 ± 25,1	37 ± 30,2	51 ± 44,6
S China ¹⁰	-	nd-1,76	13,3-144	1,41-44	3,55-78,6	7,74-57,7	14,8-110
São Paulo ¹¹	75	<0,5	40	35	13	17	60
Minas Gerais ¹²	278,11	0,91	140,74	59,62	43,01	4,23	16,5
Solos ¹³	-	0,01-2,0	5-1500	2-250	2-750	2-300	1-900

¹(FRX) Tobías et al., 1997; ²(água régia) Tobías et al., 1997b; ³(FRX) Rawlins et al., 2002; ⁴(percentil 75, HNO₃) Holmgren et al., 1993; ⁵(HNO₃ - HF - HClO₃) LU et al., 2003; ⁶(EPA 3052) Martinez-Lladó et al., 2008; ⁷Pitchelet al., 1997; ⁸(FRX) Su & yang, 2008; ⁹(bloco digestor) (media ± D.P) Zhang et al., 2008; ¹⁰Wong et al., 2002; ¹¹(água régia) (valor referência de qualidade) CETESB, 2005; ¹²(EPA 3051) (QSM² - quartil superior médio) Caires, 2009; ¹³(faixa de variação em solos de modo geral) Alloway, 1990.

Anexo B - Análise granulométrica dos solos do Estado do Pará.

Amostra	Horizontes	Areia	Argila	Silte	Textura
		-----g.kg ⁻¹ -----			
Latossolo					
1	1	752	127	120	Franco-arenosa
4	2	657	202	141	Franco-argiloarenosa
7	1	733	177	89	Franco-arenosa
10	2	570	378	52	Franco-argiloarenosa
13	1	76	729	195	Muito argilosa
16	2	28	931	40	Muito argilosa
19	1	479	479	42	Argiloarenosa
22	2	290	683	27	Muito argilosa
25	1	344	350	306	Franco-argilosa
28	2	178	106	716	Franco-siltosa
31	1	392	266	342	Franco-argilosa
34	2	292	294	413	Franco-argilosa
37	1	573	232	195	Franco-argiloarenosa
40	2	439	414	147	Argila
43	1	296	642	62	Muito argilosa
46	2	235	747	18	Muito argilosa
97	1	782	139	79	Franco-arenosa
100	2	741	189	70	Franco-arenosa
127	1	822	63	115	Areia-franca
130	2	791	113	96	Franco-arenosa
151	1	900	38	62	Areia
154	2	837	140	23	Franco-arenosa
157	1	456	342	202	Franco-argiloarenosa
160	2	397	394	209	Franco-argilosa
163	1	775	115	110	Franco-arenosa
166	2	559	397	45	Argiloarenosa
169	1	833	89	78	Areia Franca
173	2	713	228	58	Franco-argiloarenosa
181	1	909	76	15	Areia
184	2	871	127	2	Franco-arenosa
199	1	174	621	204	Muito argilosa
202	2	118	810	72	Muito argilosa
205	1	756	179	66	Franco arenosa
208	2	416	477	107	Argila
211	1	621	326	53	Franco-argiloarenosa
214	2	526	429	46	Argiloarenosa
217	1	782	154	63	Franco-arenosa
220	2	594	317	89	Franco-argiloarenosa
223	1	718	181	101	Franco-arenosa
226	2	600	296	104	Franco-argiloarenosa
229	1	651	209	140	Franco-argiloarenosa
232	2	360	405	236	Argila
235	1	453	304	244	Franco-argilosa
238	2	292	534	173	Argila
253	1	647	280	73	Franco-argiloarenosa
256	2	365	629	6	Muito Argilosa

Anexo B - Análise granulométrica dos solos do Estado do Pará.(continuação...)

Amostra	Horizontes	Areia	Argila	Silte	Textura
-----g.kg ⁻¹ -----					
Argissolo					
49	1	117	719	165	Muito argilosa
52	2	93	566	342	Argila
55	1	863	75	62	Areia-franca
58	2	667	302	31	Franco-argiloarenosa
61	1	857	102	41	franco-arenosa
64	2	619	357	24	Argiloarenosa
67	1	886	100	14	Areia-franca
70	2	776	176	49	Franco-arenosa
73	1	632	259	108	Franco-argiloarenosa
76	2	331	610	59	Muito argilosa
139	1	851	89	60	Areia-franca
142	2	718	193	89	Franco-arenosa
145	1	879	63	58	Areia-franca
148	2	677	302	21	Franco-argiloarenosa
175	1	546	397	56	Franco-argiloarenosa
178	2	403	544	53	Argila
187	1	691	237	72	Franco-argiloarenosa
190	2	436	524	40	Argila
241	1	706	159	135	Franco-arenosa
244	2	611	285	104	Franco-argiloarenosa
247	1	589	263	147	Franco-argiloarenosa
250	2	403	449	149	Argila
259	1	639	257	104	Franco-argiloarenosa
262	2	411	510	79	Argila
Nitossolo					
79	1	284	539	177	Argila
82	2	167	737	96	Argila
193	1	89	848	63	Muito argilosa
196	2	71	862	66	Muito argilosa
Plintossolo					
85	1	634	191	176	Franco-arenosa
88	2	603	241	157	Franco-argiloarenosa
Neossolo					
91	1	879	88	34	Areia-franca
94	2	791	113	96	Franco-arenosa
Gleissolo					
106	1	47	299	654	Franco-argilosiltosa
109	2	74	141	785	Franco-siltosa
112	1	49	168	783	Franco-siltosa
115	2	243	177	580	Franco-siltosa
118	1	346	125	529	Franco-siltosa
121	2	727	142	131	Franco-arenosa
124	1	809	91	100	Areia-franca
106	2	47	299	654	Franco-siltosa
Cambissolo					
133	1	436	400	165	Franco-argilosa
136	2	439	396	166	Franco-argilosa