



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

EDNA SANTOS DE SOUZA

**ATRIBUTOS DOS SOLOS DO ESTADO DO PARÁ E TEORES NATURAIS DE
ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM SOLOS NO ENTORNO DA
RODOVIA TRANSAMAZÔNICA, AMAZÔNIA-ORIENTAL**

**BELÉM
2013**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

EDNA SANTOS DE SOUZA

**ATRIBUTOS DOS SOLOS DO ESTADO DO PARÁ E TEORES NATURAIS DE
ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM SOLOS NO ENTORNO DA
RODOVIA TRANSAMAZÔNICA, AMAZÔNIA-ORIENTAL**

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

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fernandes Rodrigues

**BELÉM
2013**

Souza, Edna Santos de

Atributos dos solos do Estado do Pará e teores naturais de elementos potencialmente tóxicos em solos no entorno da Rodovia Transamazônica, Amazônia-Oriental / Edna Santos de Souza. - Belém, 2013.

63 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia/Embrapa Amazônia Oriental, 2012.

1. Solos Tropicais - óxido 2. Metais pesados 3. Amazônia Oriental I. Título.

CDD – 631.41



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

EDNA SANTOS DE SOUZA

ATRIBUTOS DOS SOLOS DO ESTADO DO PARÁ E TEORES NATURAIS DE
ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM SOLOS NO ENTORNO DA
RODOVIA TRANSAMAZÔNICA, AMAZÔNIA-ORIENTAL

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do
Curso de Mestrado em Agronomia: área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de Mestre.

Aprovado em Fevereiro 2013

Prof. Dr. Antonio Fernandes Rodrigues – Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

Prof. Dr. Milton César Costa Campos – 1º Examinador
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Pesq^a. Dra^a. Cristine Bastos do Amarante – 2º Examinador
Museu Paraense Emilio Goeldi - MPEG

Prof^a. Dr. Letúzia Maria de Oliveira – 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

Belém-PA
2013

Alguns homens veem as coisas como são, e dizem
“Por quê?” Eu sonho com as coisas que nunca
foram e digo “Por que não?” (Geroge Bernard Shaw).

Aos meus Pais (Erotildes e Noemia) por ter estado do meu lado realizando esse sonho, pela confiança, dedicação e apoio que tiveram comigo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, autor e criador de tudo, pela saúde e disposição concedidas; pelas pessoas que estiveram comigo; pelas oportunidades que me permitiu cumprir minha jornada com satisfação.

À minha família, pela formação ética e moral que me proporcionou, sem as quais não teria tido a indignação necessária e as reflexões suficientes à idealização, persistência e desenvolvimento do presente trabalho.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Antonio Fernandes Rodrigues, pela orientação, paciência e comprometimento para a realização deste trabalho.

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

Aos Professores e demais profissionais da Universidade Federal Rural da Amazônia.

Ao Prof. Dr. Luis Reynaldo Ferracciu Alleoni, pela oportunidade de realizar as análises químicas no departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP- PROCAD.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ, Luís Silva, Marina Colzato, Debora Grandino pelo auxílio nas análises laboratoriais.

Obrigado especial aos amigos e profissionais que, nas diversas fases colaboraram para a realização do presente trabalho; são eles: Deyvison Medrado, Nilvan Melo, João Roberto, Jorcival Rodrigues, Francisco Assis, Jessivaldo Galvão, Valcir Farias, Rafael Guedes, Rafael Lira, Renato Teixeira e Thais Penha.

As colegas Ianna Dantas, Gabriela Rosa, Vanessa Teixeira e Mariane Romeiro pelo apoio, hospedagem e companheirismo durante a minha estadia em Piracicaba-SP, obrigada!

A minha amiga Lorena Lira, companheira de sala, de campo e de laboratório, obrigado por dividir esse sonho e torna-lo realidade.

Ao amigo Otinel Ferreira Nunes pela paciência e ajuda nas análises estatísticas, pela colaboração em diversas fases deste trabalho, cujas reflexões, intervenções, incentivo e apoio, muito contribuíram para o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento, obrigada!

As amigas e irmãs de coração que independente da distância geográfica estiveram sempre perto apoiando, incentivando e dividindo este sonho comigo: Ângela Eugênio e Luana Silva muito obrigada!

Aos republicanos, Leandro Borges, Elton Rodrigues e Andreia Portugal pelo convívio, amizade e companheirismo durante estes dois anos de curso.

Agradeço a todos aqueles que acreditaram em mim e colaboraram com a minha formação. Às vezes a ajuda foi laboriosa, em outras, ela foi tênue e suave, como um olhar ou um aceno, mas que foi fundamental para a realização desse sonho.

BIOGRAFIA

Edna Santos de Souza, filha de Erotildes Viera de Souza e Noemia Santos de Souza, nasceu em Uruará, Pará aos 13 dias do mês de Novembro de 1985.

Em agosto de 2006, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal Pará, Campus de Altamira.

Em dezembro de 2010, graduou-se em Agronomia na Universidade Federal do Pará, Campus de Altamira.

Em março de 2011, iniciou o curso de Pós-graduação em nível de mestrado em Agronomia, na área de Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre, na Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA.

SUMÁRIO

RESUMO	15
ABSTRACT	16
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	8
LITERATURA CITADA	10
2 ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DAS CLASSES DE SOLOS REPRESENTATIVAS DO ESTADO DO PARÁ.....	12
RESUMO	13
SUMMARY	13
2.1 INTRODUÇÃO.....	14
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
2.4 CONCLUSÕES.....	28
LITERATURA CITADA.....	28
3 TEORES DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM SOLOS NO ENTORNO DA RODOVIA TRANSAMAZÔNICA, AMAZÔNIA-ORIENTAL.....	33
RESUMO	34
SUMMARY	34
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
3.4 CONCLUSÕES.....	52
LITERATURA CITADA.....	52
4 CONCLUSÃO GERAL	58

Souza, Edna Santos. **Atributos dos solos do estado do Pará e teores naturais de elementos potencialmente tóxicos em solos no entorno da rodovia Transamazônica, Amazônia-Oriental.** Belém: UFRA, 2013. 51 p (Dissertação – Mestrado em Agronomia).

RESUMO

Os solos do estado do Pará apresentam acentuada variabilidade em função tanto da diversidade de material de origem quanto das condições bioclimáticas da região. A variabilidade nos fatores e processos de formação do solo afetam os processos biogeoquímicos incluindo adsorção de nutrientes e elementos potencialmente tóxicos. Os elementos potencialmente tóxicos ocorrem naturalmente no ambiente geralmente em baixas concentrações. Por outro lado, o estudo de elementos potencialmente tóxico é orientado a partir do teor total, no entanto, esse não é um indicativo completo de contaminação, pois somente parte dos metais apresentam mobilidade no perfil do solo e está disponível para a absorção pelas plantas. O objetivo foi avaliar os atributos físicos e químicos nas classes representativas do estado do Pará e determinar os valores disponíveis dos elementos potencialmente tóxicos: bário (Ba), cádmio(Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo(Cr), ferro (Fe), manganês(Mn), alumínio (Al) e zinco (Zn) na camada de 0-0,2 m, por meio das soluções extratores: DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3. Foram coletadas amostras de solos em áreas de vegetação primária com mínima intervenção antrópica. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Foram realizadas análises de pH em água, P disponível, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{+3} trocáveis, acidez potencial e matéria orgânica (MO). Com os resultados obtidos nas análises do complexo sortivo, foram calculadas a soma de bases trocáveis, a capacidade de troca catiônica e as saturações por bases e por alumínio. Foram determinados os óxidos de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO e TiO_2 por ataque sulfúrico, oxalato de amônio e ditionito-citrato-bicarbonato⁻ de sódio e análise granulométrica. Foi realizado teste de normalidade de Shapiro-Wilk, matriz de correlação de Pearson, análise descritiva, análise de componentes principais, análises de clusters, teste de significância de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) e teste de Kruskalmc. As relações Feo/Fed e Fed/Fet foram baixas indicando predomínio das formas cristalinas em relação as amorfas e grau avançado de intemperamento respectivamente, com valores baixos de K^+ , P, Ca^{2+} e Mg^{2+} e alto teor de Al^{+3} no complexo de troca. Os teores dos óxidos de silício, alumínio e ferro extraídos por ataque sulfúrico aumentaram com a profundidade e diferenciaram entre as classes de solos com teores mais elevados em Cambissolos, Nitossolos e Latossolos. Os teores de óxidos de Fe e Mn foram mais altos em Cambissolos e Nitossolos, caracterizando como solos ricos em minerais ferruginosos. Os teores disponíveis de elementos potencialmente tóxicos nos solos foram para DTPA-TEA na ordem de $Fe > Al > Mn > Ba > Cu > Zn > Co > Cd > Pb$; Mehlich 1 $Al > Fe > Mn > Ba > Cu > Zn > Co > Pb > Cd$ e Mehlich 3, foram na ordem $Al > Fe > Mn > Ba > Cu > Co > Zn > Pb > Cd$. Correlações significativas foram estabelecidas entre os metais e a MO, pH, CTC, os óxidos de Fe e Mn. Os elementos Cu, Mn, Fe e Zn mostraram correlação significativa para os três métodos indicando similaridade nas formas extraídas. Mehlich 3 foi mais eficaz para extrair os metais Fe, Al e Pb do que Mehlich 1 e DTPA-TEA e igualmente eficiente para Cd, Mn, Zn e Cu. Os teores extraídos de metais por cada método variaram na ordem M3, M1 e DTPA-TEA.

Termos de indexação: Metais pesados, Óxidos em solos tropicais, Amazônia Oriental

ABSTRACT

Soils from Pará State show accentuated variability depending on both the diversity of parental material as bioclimatic conditions of the region. The variability in the factors and processes of soil formation affect biogeochemical processes, including absorption of nutrients and potentially toxic elements. The potentially toxic elements occurring in the environment at low concentrations. The potentially toxic elements study is oriented from the total content, however, the total content is not completely indicative of contamination, because only part shows mobility in the soil profile and is available to plant absorption. The aim was evaluate the physical and chemical attributes of soil classes most representative from Pará State and determine the amounts of potentially toxic element available barium (Ba), cadmus (Cd), lead (Pb), cobalt (Co), copper (Cu), chrome (Cr), iron (Fe), manganese (Mn), aluminum (Al), and zinc (Zn) in the 0-0,2 m layer, through extractors solutions, DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3,. Soil samples were collected in primary vegetation field with minimal anthropic intervention. The samples were air dried and passed through a 2 mm sieve. Were determined chemical analysis, pH in water, available P, exchangeable K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{+3} , potential acidity and organic matter. With the results obtained in the sorption complex analysis were calculated the sum of exchangeable bases, the cation exchange capacity and base and Al saturation. Were determined SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO e TiO_2 oxides by sulfuric acid attack, oxalate and dithionite-citrate-bicarbonate and particle size analysis. Was performed Shapiro-Wilk normality test, Pearson correlation matrix, descriptive analysis, principal component analysis, cluster analysis, Kruskal-Wallis significance test ($p < 0,05$) and Kruskalmc test. The ratio Fe_o/Fed and Fed/Fet were low indicating predominance of crystalline forms in relation the amorphous and advanced degree weathering respectively, with low K^+ , P, Ca^{2+} and Mg^{2+} amounts and high Al^{+3} content in the exchange complex. The contents of silicon, aluminum and iron oxides extracted by sulfuric acid attack increased with depth and were different among soil classes with amounts higher in Inceptisols, Alfisols and Oxisols. The amount of Fe and Mg oxides were higher in Alfisols and Inceptisols, characterizing as rich soil in ferruginous minerals. The available amount of potentially toxic element in soils to DTPA-TEA in the order of $Fe > Al > Mn > Ba > Cu > Zn > Co > Cd > Pb$; Mehlich 1 $Al > Fe > Mn > Ba > Cu > Zn > Co > Pb > Cd$ and Mehlich 3 were in the order of $Al > Fe > Mn > Ba > Cu > Co > Zn > Pb > Cd$. Significant correlations were established between metals and MO, pH, CTC, Fe and Mn oxides. The elements Cu, Mn, Fe and Zn show significant correlation among for all three methods, indicating similarity in the extracted form. Mehlich 3 was more effective to extract the metals Fe, Al, Mn and Pb than Mehlich 1 and DTPA-TEA and equally efficient for Cd, Mn, Zn and Cu. The contents of metals extracted by each method varied in the order M3, M1 and DTPA-TEA.

Keywords: Heavy Metals, Oxides in Tropical Soils, Oriental Amazon

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As características mineralógicas e químicas dos solos são dependentes da natureza do material de origem e dos processos pedogenéticos que atuam em diferentes intensidades ao longo da paisagem, resultando na variação espacial dos atributos do solo (QUESADA et al., 2009). Os solos da Amazônia apresentam acentuada variabilidade em função tanto da diversidade de material de origem quanto das condições bioclimáticas da região (ORRUTÉA et al., 2012).

A formação geológica do estado do Pará está representada por litologias dos períodos Arqueanos e Pré-cambriano, Ordoviciano, Carbonífero, Jurássico, Cretáceo/Terciário e Quaternário, caracterizado por uma ampla diversidade litológica, predominando as rochas sedimentares como os argilitos, siltitos, arenitos, calcários, dolomitas, folhelhos, rochas vulcânicas (basalto, diabásio, andesito), rochas piroclásticas (tufos lapílico), granitos e biotita (RODRIGUES et al., 2007a). Os solos de maneira geral são de baixa fertilidade, com a mineralogia da fração argila predominantemente caulinitica e o oxídica (RODRIGUES et al., 2007).

A maioria das pesquisas sobre os solos no estado do Pará revelou grau avançado de intemperismo, baixa fertilidade natural, baixos teores de fósforo disponível, pH muito ácido e presença de mineralogia oxídica e caulinitica. Algumas exceções são os solos de planície aluvial e os solos desenvolvidos sobre influências de rochas básicas que são eutróficos (FALESI, 1986; FARELLA et al., 2007; BRÁZ, 2011).

Ainda assim, o estado do Pará apresenta carência de estudos mais detalhados de solos, de um modo geral as principais classes de solo caracterizadas e mapeadas no estado são os Latossolos, Argissolos, Gleissolos, Plintossolos, Neossolos, Cambissolos e Espodossolos, sendo em geral caracterizados como solos distróficos e ácidos e algumas manchas isoladas de Nitossolos Eutróficos (FALESI, 1986; RODRIGUES et al., 2007b; BRÁZ, 2011).

Entretanto os conhecimentos prévios sobre os recursos do solo são necessário para embasar a adoção de formas de manejo e práticas de conservação mais adequadas para cada região, reduzindo-se, assim, o custo econômico e o impacto ambiental que uma exploração agrícola e mineral pode acarretar (BERNINI, 2010).

Nas últimas décadas níveis elevados de elementos potencialmente tóxicos no solo, na água e em plantas foram relatados em diversas partes do mundo, causando preocupação quanto a qualidade ambiental e a saúde humana. Ocorrem naturalmente no ambiente em baixas concentrações e referem-se a elementos com densidade atômica maior que 6 g cm^{-3} ou que possuem número atômico maior que 20 (ALLOWAY, 1995; ADRIANO, 2001). Os elementos potencialmente tóxicos estão entre os contaminantes ambientais mais comuns, principalmente por não serem degradáveis,

permanecendo por longos períodos no ambiente, representando ameaça potencial à biodiversidade e aos ecossistemas (COTTA et al., 2006).

Embora a concentração total de elementos potencialmente tóxicos em solos trazerem uma informação importante sobre os níveis de poluição, geralmente não é um índice adequado para estimar a disponibilidade dos elementos, pois o fato de estar presente no solo não significa que esteja numa forma prontamente assimilável pelas plantas, podendo permanecer por longos períodos sem ser absorvido em quantidades tóxicas (DISLA et al., 2010; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2010; ZHANG et al., 2010) às plantas e animais.

Assim, vários métodos de extração são propostos para obtenção dos teores disponíveis, envolvendo diferentes tipos de soluções, tais como, ácidos fortes como Mehlich 1, agentes quelantes, como DTPA-TEA, ou soluções ácidas e quelantes, como Mehlich 3 (ANDRADE et al., 2009; OTERO et al., 2012; ROCA et al., 2012). Por outro lado, muitos estudos foram realizados visando avaliar a ação dos extratores sobre a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos, no entanto, não foi estabelecido um método universal que estime eficientemente os teores disponíveis (MILAGRES et al., 2007).

O extrator Mehlich 1 por exemplo extraiu maiores teores de Zn, Mn e Cu do solo quando comparado ao quelante DTPA-TEA em trabalho avaliando a concentração natural desses micronutrientes em solos no Paraná (ORTIZ et al., 2007). No entanto, em estudo sobre a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos em solos também no estado do Paraná, o extrator DTPA-TEA foi mais eficiente que os extratores Mehlich 1 e Mehlich 3 na avaliação dos teores disponíveis dos metais Fe e Zn (SARTO et al., 2011). Os nutrientes Cu e Zn apresentaram correlação positiva entre as soluções extratoras Mehlich 3 e DTPA-TEA, por isso foram considerados eficientes para avaliar a disponibilidade desses nutrientes em solos na Irlanda (BRENNAN et al., 2008).

Em relação aos solos do estado do Pará as informações são baseadas, principalmente, em levantamentos restritos para algumas classes de solos ou regiões, já que poucos são os trabalhos que abrangem em nível de Estado. As pesquisas sobre a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos também são incipientes, assim como a definição do método mais adequado para estimar os teores disponíveis desses elementos.

Assim neste trabalho foram levantadas as seguintes hipóteses e objetivos:

- ✓ Há diferenças nos atributos físicos e químicos nos solos do estado do Pará, em função das diferentes classes de solos.
- ✓ Há diferença de extração de elementos potencialmente tóxicos disponíveis nos solos do estado do Pará entre as soluções extratoras DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3;

Há correlação entre os teores de elementos potencialmente tóxicos e os atributos físicos e químicos dos solos;

Os objetivos foram avaliar os atributos físicos e químicos das classes de solos mais representativas do estado do Pará e determinar os teores disponíveis dos metais bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) pelas soluções extratoras DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3 em solos sob condições naturais.

LITERATURA CITADA

ADRIANO, D. Trace Elements in Terrestrial Environments. **Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals**. Second ed. Springer, New York, 2001.

ALLOWAY, B. J. The origins of heavy metals in soil. In: ALLOWAY, B. J (ed.). **Heavy metals in soils**. 2ed. London: Blackie Academic. 38 – 57, 1995.

ANDRADE, M. G.; MELO, V. F.; SOUZA, L. C. P.; GABARDO, J.; REISSMANN, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. II - formas e disponibilidade para plantas. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, 33:1889-1897, 2009.

BERNINI, T. A. **Caracterização mineralógica, identificação das substâncias húmicas e quantificação do alumínio em solos da formação Solimões – Acre**. Dissertação (mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

BRAZ, A. M. S. **Coefficiente de distribuição de metais pesados em solos paraenses**. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

COTTA, J. A. O.; REZENDE, M. O. O.; PIOVANI, M. R. Avaliação do teor de metais em sedimento do rio Betari no parque estadual turístico do Alto Ribeira - Petar, São Paulo, **BrasilQuímica Nova**, v. 29, p. 40-45, 2006.

DISLA, J. M. S.; SPEIR, T. W.; GÓMEZ, I.; CLUCAS, L. M.; MCLAREN, R. G.; PEDREÑO, J. N. Evaluation of Different Extraction Methods for the Assessment of Heavy Metal Bioavailability in Various Soils. **Water, Air, Soil, Pollut.** 213: 471–483, 2010.

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

FARELLA, N.; DAVIDSON, R.; LUCOTTE, M.; DAIGLE, S. Nutrient and mercury variations in soils from family farms of the Tapajos region (Brazilian Amazon): Recommendations for better farming. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 120: 449–462, 2007.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soil and plants**. 4ed, p.cm. 2010.

MILAGRES, J. J. M.; ALVAREZ V, V. H.; CANTARUTTI, R. B; NEVES, J. C. L. Determinação de Fe, Zn, Cu e Mn extraídos do solo por diferentes extratores e dosados por espectrofotometria de

emissão ótica em plasma induzido e espectrofotometria de absorção atômica. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, 31:237-245, 2007.

ORRUTEA, A. G.; MELO, V. de F.; MOTTA, A. C. V.; LIMA, V. C. **Mineralogia e reserva de K de Cambissolos submetidos a diferentes manejos após derrubada e queima da floresta na Amazônia Meridional.** *Acta Amazonica*, 42:461-470, 2012.

ORTIZ, F. R.; BRITO, O. R.; BORKERT, C. M. Extratores para a quantificação de zinco cobre e manganês em solo arenoso. *ScientiaAgraria*, 8:95-98, 2007.

OTERO, X. L.; ÁLVAREZ, E.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J.; MACÍAS, F. Micronutrients and toxic trace metals in the bulk and rhizospheric soil of the spontaneous vegetation at an abandoned copper mine in Galicia (NW Spain). *Journal of Geochemical Exploration*. 112:84-92, 2012.

QUESADA, C. A.; L. LOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, E. C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the rainfor sites. *Biogeosciences*, 6:3851-3921, 2009.

ROCA, N. PAZOS.; M, S. BECH. J. Background levels of potentially toxic elements in soils: A case study in Catamarca (a semiarid region in Argentina). *Catena*, 92:5-66, 2012.

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. C.; SILVA, B. N. R.; SILVA, J. M. L.; VALENTE, M. A.; DARIVA, T. A.; SOUTO DE JESUS, A. A.; VENTURIERI, A. Caracterização, mapeamento e classificação dos solos da área de influência da BR-163 (Cuabá-Santarém) e da BR-230 (Transamazônica), no Estado do Pará. In: **Embrapa Amazônia Oriental, ed. Zoneamento-Ecológico Econômico da área de influência da rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém).** Belém, PA., 2007a. P. 403-571.

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. C.; SILVA, B. N. R.; SILVA, J. M. L.; VALENTE, M. A.; DARIVA, T. A.; SOUTO DE JESUS, A. A.; VENTURIERI, A. Avaliação da aptidão agrícola das terras de influência da BR-163 (Cuabá-Santarém) e da BR-230 (Transamazônica), no Estado do Pará. In: **Embrapa Amazônia Oriental, ed. Zoneamento-Ecológico Econômico da área de influência da rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém).** Belém, PA., 2007b. P. 375-399.

SARTO, M. V. M.; STEINER, F.; LANA, M. C. Assessment of micronutrient extractants from soils of Paraná, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, 35:2093-2103, 2011.

ZHANG, M. K.; LIU, Z.; WANG, H. Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice. *Communications in soil science and plant analysis*, 41:820-831, 2010.

2 ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DAS CLASSES DE SOLOS REPRESENTATIVAS DO ESTADO DO PARÁ

RESUMO

Os solos da Amazônia são naturalmente heterogêneos, devido à diferença na composição do material de origem e dos processos pedogenéticos que atuam em sua formação, resultando na heterogeneidade de seus atributos. Por outro lado, as pesquisas sobre os solos da região ainda são incipientes e baseadas, principalmente, em levantamentos generalizados o que limita o planejamento sustentável de uso dos recursos naturais. O objetivo foi caracterizar os atributos físicos e químicos das classes de solos mais representativas no estado do Pará. Foram determinado, pH em água, P disponível, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{+3} trocáveis, acidez potencial e carbono orgânico, em seguida foram calculadas capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por Al. Foram determinados os óxidos de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO e TiO_2 por ataque sulfúrico, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO oxalato de amônio, FeO_3 livre por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e análise granulométrica. Foi realizado análise de componente principal, análise de clusters e análise descritiva dos dados. Os teores de K^+ , P, Ca^{2+} e Mg^{2+} foram baixos, e os teores de Al^{+3} alto, indicando caráter distrófico ou álico. A relação Fed/Fet foi baixa indicando a presença de solos intemperizados. Os teores dos óxidos de silício, alumínio e ferro extraídos por ataque sulfúrico foram maiores na camada de subsuperfície e diferenciaram entre as classes de solos, com teores mais elevados em Cambissolos, Nitossolos e Latossolos. Os teores de óxidos de Fe e Mn foram mais altos em Cambissolos e Nitossolos, caracterizando como solos ricos em minerais oxidado.

Termos de indexação: Amazônia, atributos do solo, solos tropicais

SUMMARY

The Amazon soils are naturally heterogeneous, due difference in parental material composition and pedogenic processes that act in the formation, resulting in the heterogeneity of attributes. Moreover, research about region soils are still incipients and based mainly in generalized surveys, which limits the planning sustainable natural resources. The aim was to characterize the chemical and physical attributes of soil classes most representative from Pará State. Were determined pH in water, available P, exchangeable K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{+3} , potential acidity and organic carbon. With the results obtained in the sorption complex analysis were calculated the sum of exchangeable bases, the cation exchange capacity and base and Al saturation. Were determined SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO e TiO_2 oxides by sulfuric acid attack, oxalate and dithionite-citrate-bicarbonate and particle size analysis. Was performed principal component analysis, cluster analysis and descriptive analysis of the data. The contents K^+ , P, Ca^{2+} and Mg^{2+} were low and high Al^{+3} content in the exchange

complex, indicating dystrophic or alic character. The ratio Fe_o/Fe_d and Fe_d/Fe_t were low indicating presence of weathered soils. The amount of silicon, aluminum and iron oxides extracted by sulfuric acid attack were higher in subsurface layer and differentiate between soil classes with higher amounts in Inceptisols, Alfisols and Oxisols. The amount of Fe and Mg oxides were higher in Alfisols and Inceptisols, characterizing as rich soil in oxidic minerals.

Index terms: Amazon, Physico-Chemical Properties of Soil, Topical Soils

2.1 INTRODUÇÃO

Os solos da região Amazônica são naturalmente heterogêneos devido à diferença na composição do material de origem e dos processos pedogenéticos que atuaram em sua formação (Quesada et al., 2009), resultando em alterações nos atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos (Lima et al., 2006).

A Amazônia brasileira, com mais de cinco milhões km² e 60% da área total da floresta amazônica, apresenta grande diversidade de tipos de solo. No entanto, o conhecimento sobre os solos da região ainda são incipientes e baseadas, principalmente, em levantamentos generalizados o que limita o planejamento do uso dos recursos naturais (Moreira & Fageria, 2009) e a preservação da biodiversidade. Os solos de ocorrência dessa região pertencem principalmente às ordens dos Latossolos e Argissolos representando mais de 70% dos solos da região, em menores expressões encontram-se os Plintossolos, Nitossolos, Neossolos, Espodossolos e Cambissolos (Rodrigues et al., 2007).

Independentemente do tipo de solo, predomina na região dois tipos de ambientes fisiográficos: áreas de terra firme, que representam aproximadamente 80% da região, não sofrem inundações e geralmente apresentam solos profundos e muito intemperizados e os ambientes de várzea, que correspondem à planícies as margens dos rios, sujeitos a elevação do nível do lençol freático e inundação periódica (Moreira & Fageria 2009; Lima et al., 2006).

Os solos de terra firme são caracterizados como de baixa fertilidade natural, baixa capacidade de troca catiônica, argila de baixa atividade e baixo pH. Os solos de várzea, normalmente possuem teores elevados de silte e de areia fina, elevada capacidade de troca de cátions e argila de atividade alta (Lima et al., 2006), nestes dois ambientes predomina mineralogia de fração argila caulinítica e oxidica (Falesi, 1986).

A heterogeneidade do material de origem e as condições bioclimáticas da Amazônia contribuem para a formação de diferentes tipos de solos na região. Assim o conhecimento detalhado dos atributos físicos e químicos dos solos é fundamental para a adoção de manejo adequado, pois, o

uso agrícola do solo depende de um enfoque multidisciplinar na avaliação dos problemas e no estudo de soluções (Benedetti et al., 2011), evitando intervenções inadequadas que incorram em prejuízos financeiros, sociais e ambientais.

O objetivo foi caracterizar os atributos físicos e químicos das classes de solos mais representativas do estado do Pará.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

As coletas de solos foram realizadas em 33 municípios do estado do Pará. A escolha destes municípios levou em conta os seguintes critérios: apresentam maior índice populacional, elevada atividade de extração mineral e o uso agropecuário, tendo nestes dois últimos a principal atividade econômica. Outro critério adotado foram os municípios localizados às margens da rodovia Transamazônica (BR-230) (Figura 1).

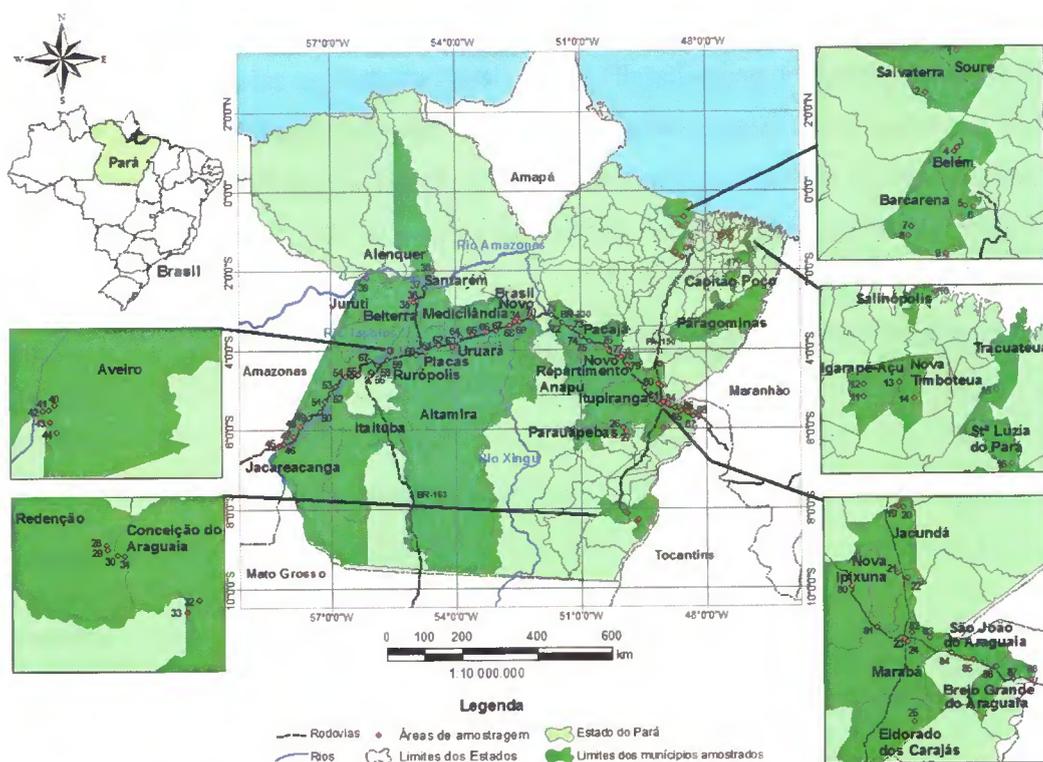


Figura 1. Mapa de localização das áreas de amostragem do solo no estado do Pará.

A BR-230 atravessa uma região de fronteira que, desde a década de 70, recebe investimento por parte do governo federal para instalação de grandes projetos como as hidrelétricas, extração mineral e assentamento da reforma agrária. Essas atividades têm contribuído para especulação fundiária e os altos índices de desmatamento e degradação do solo. Por outro lado, os demais municípios do Estado que não foram escolhidos para amostragem se deve ao fato de nestes terem

maiores concentrações de áreas indígenas, parques nacionais, reservas extrativistas e unidades de conservação. Por isso, os solos prevalecem em sua maior parte preservados.

No Pará, a formação geológica predominante são as rochas sedimentares, os argilitos, siltitos, arenitos, em menor escala as rochas vulcânicas como basalto e diabásio. Os solos, de uma forma geral, são caracterizados como de baixa fertilidade, caráter ácidos e a mineralogia caulínica e oxidica (Falesi, 1986). Os Latossolos e Argissolos são as principais classes de solos, abrangendo mais de 70% dos solos do estado do Pará (Rodrigues et al., 2007).

O clima é equatorial do tipo Am-Aw na classificação de Köppen, com variações dependendo da região do Estado. As temperaturas médias anuais variam entre 25 a 27 °C. A precipitação anual varia entre 1.400 e 2.800 mm, sendo um período chuvoso (janeiro a julho) concentrando mais de 70% da precipitação anual e período seco (agosto a dezembro).

Os solos coletados foram classificados como pertencentes à ordem dos Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Plintossolos, Neossolos, Gleissolos e Cambissolos (Quadro 1). Essas classes de solos foram mapeadas e caracterizadas com base nos critérios e características diferenciais estabelecidos para enquadrá-las no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), a partir da sobreposição de mapas referente a solos da região, como o Zoneamento- Ecológico Econômico da área de influência da Br-163 (Cuiabá-Santarém) e Br 230 (Transamazônica), no estado do Pará (Rodrigues et al., 2007a) e Solos da Rodovia Transamazônica (Falesi, 1986).

Quadro 1. Classes de solos, áreas coletadas no estado do Pará

Solos ¹	Áreas de coletas	Amostras coletadas	Total %
Latossolos	52	312	52,5
Argissolos	26	156	26,3
Nitossolos	3	18	3,0
Plintossolos	4	24	4,0
Neossolos	6	36	6,1
Gleissolos	5	30	5,1
Cambissolos	3	18	3,0
Total	99	594	100

(1) Classificação do 1º nível taxonômico – Ordens, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa, 2006).

As amostras foram coletadas em áreas de vegetação primária ou secundária com mais de 20 anos de regeneração, observando-se distância de aproximadamente de 100 m das rodovias. A seleção das áreas levou-se em consideração homogeneidade das condições biogeoclimáticas e áreas livres de perturbações antrópicas, como o desmatamento, uso agropecuário ou extração mineral.

Foram coletadas amostras na camada de 0,0-0,2 m em todas as classes de solos, 0,8-1,0 m em Latossolos, Argissolos, Nitossolos e Plintossolos e 0,4-0,6 para Neossolos, Gleissolos e

Cambissolos. As profundidades estão em consonância com os horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais dessas classes de solos, nessa região. Coletou-se 10 amostras simples, a uma distância de 70 m entre si, para obtenção de uma amostra composta, sendo considerada a homogeneidade entre as amostras quanto à cor, topografia, drenagem e cobertura vegetal, segundo metodologia proposta por Silva (1999).

Em cada área foram coletadas três amostras compostas por profundidade, em um total de 297 amostras, e 99 áreas. Na rodovia Transamazônica as áreas de coletas eram equidistantes entre 20 a 40 km entre si, nos demais municípios do Estado às coletas foi aleatória de acordo a disponibilidade de áreas com vegetação primária ou secundária em estágio final de regeneração (mais de 20 anos). As coletas foram realizadas com trado Holandês de aço inoxidável de acordo com procedimentos padrões adotados pela Cetesb (2001), de forma a evitar contaminação. As amostras coletadas foram secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura de malha, obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando a solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica de alta rotação por 10 minutos. A fração argila foi separada por sedimentação; a areia por tamisação e o silte, calculado por diferença (Embrapa, 1997).

O pH foi determinado potenciométricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo: em água. O cálcio, magnésio e alumínio trocável, foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹. O Al³⁺ foi quantificado por titulometria com 0,025 mol L⁻¹ de NaOH e o Ca²⁺ e Mg²⁺ por espectrofotometria de absorção atômica. O K⁺ e P foram extraído por Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L⁻¹+H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹). O K⁺ foi determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria (Embrapa, 1997).

A acidez potencial (H+Al) foi extraído pela solução tamponada de acetato de cálcio 1,0 mol L⁻¹, a pH 7,0 e determinada por titulação com NaOH, utilizando-se metodologia proposta pela Embrapa (1997). O carbono orgânico foi quantificado por colorimetria de acordo Raij et al. (2001), e a matéria orgânica (MO), estimada com base no C orgânico total. A partir dos resultados do complexo sortivo, foram calculados os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

Os teores dos óxidos de Si, Al, Fe, Mn e Ti expressos como óxidos (SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, MnO e TiO₂) foram determinados pelo o método do ataque sulfúrico, usando H₂SO₄ 1:1. Os teores dos óxidos Fe, Al e Mn foram determinados pelo espectrofotômetro de absorção atômica, o Ti por colorimetria e Si por gravimetria, conforme descrito pela Embrapa (1997). Os índices de Ki e Kr que avaliam o grau de intemperismo do solo foram determinados pelas relações molares Ki e Kr, onde o Ki é calculado pela relação (Ki = 1,7 × SiO₂/Al₂O₃) e Kr (Kr = 1,7 (SiO₂/(Al₂O₃ + 0,64 Fe₂O₃)).

Os óxidos mal cristalizados (“amorfos”) de $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{Fe}_{\text{OAA}})$, $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Al}_{\text{OAA}})$, $\text{MnO}(\text{Mn}_{\text{OAA}})$ foram determinados pelo método do ácido oxálico e oxalato de amônio, os óxidos de ferro “livre” ou cristalino (Fe_{DCB}) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Camargo et al., 1986; Loeppert & Inskeep, 1996), quantificados por espectrofotometria de absorção atômica.

Os resultados analíticos foram avaliados pela análise descritiva, considerando os parâmetros de média, máximo, mínimo e coeficiente de variação (CV) e técnicas multivariadas, como análise de agrupamento hierárquico (AAH) e análise de componente principal (ACP). A fim de evitar interferências das unidades de medida nas análises de componentes principais e de agrupamento, os dados foram padronizados, obtendo-se média = 0 e variância = 1. Nas AAH a distância euclidiana foi adotada como medida de similaridade. O conjunto de variáveis utilizadas na AAH e ACP foram MO, pH, Ca, Mg, Al, H+Al, K, P e os óxidos de Si, Al, Mn, Fe e Ti, em um total de 594 mostras de solos. As variáveis adotadas na análises de AAH e ACP foram as que apresentaram correlações mínima suficientes pela correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) para explicar a variação dos dados (Hair Jr. et al., 2009)

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de pH em água apresentaram baixa variação nas camadas superficiais e subsuperficiais dentre as classes de solos estudadas e entre as classes de solos, valores mais altos foram observados para Nitossolos e Gleissolos e menores valores para Neossolos, de forma geral os teores variaram de 3,3 a 6,4 na camada superficial e subsuperficial (Quadro 2 e 3). A maioria das amostras coletadas (71,4%) indicam solos de acidez elevada (Alvarez et al., 1999). Baixos valores de pH foram relatados em outras partes da Amazônia por Falesi (1986), Melo et al. (2006), Moreira e Fageria (2009), Benedetti et al. (2011) e Campos et al. (2012).

Os teores de MO foram superiores na camada superficial em todas as classes de solos com média entre 14,8 e 72,0 g kg^{-1} , os maiores teores de MO foram encontrados em Gleissolos, Cambissolos e Nitossolos. Condições hidromórficas diminuem a decomposição e oxidação da MO justificando teores mais elevados em Gleissolos. Os altos teores de argila e de óxidos em Cambissolos e Nitossolos contribuem para manter a MO protegida da decomposição microbiana favorecendo o acúmulo em superfície (Müller & Höper, 2004).

Os teores de fósforo (P) disponíveis foi maior em superfície com amplitude de 2,0 a 8,8 mg kg^{-1} em relação a camada de subsuperfície com amplitude de 0,9 a 3,0 mg kg^{-1} (Quadro 2 e 3). Os valores médios de P variaram na ordem crescente de Gleissolos, Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Nitossolos, Neossolos e Plintossolos sendo classificados como muito baixo em todas as classes de solos, exceto em Gleissolos que foi alto (16,2 mg kg^{-1}). Maiores teores de P

disponíveis foi condizentes com os horizontes A, devido o maior teor de MO, visto que, o material de origem desses solos é pobre em P. Redução nos teores de P com a profundidade em solos do estado do Acre, foi observada por Araújo et al. (2011), os quais atribuíram a diminuição dos teores de CO, também com a profundidade. No estado do Amazonas, Campos et al. (2012) relataram teores de P mais altos em áreas de planícies aluviais em relação as áreas de terra firme e relacionou os altos teores de P a deposição de sedimentos dos Andes. Em 60,6% dos solos do estado do Pará os teores de P ficaram abaixo de $6,6 \text{ mg kg}^{-1}$ considerado muito baixo de acordo a classificação de Alvarez et al. (1999), e 63,3% ficaram abaixo de 8 mg kg^{-1} considerado baixo pela classificação da Embrapa (2007), que caracteriza deficiência de P no solo, para a maioria das culturas, e a necessidade de adubação fosfatada. O baixo nível de P pode estar relacionado à pobreza no material de origem e imobilização do P nos minerais de argila e nos óxidos de Fe e Al (Farella et al., 2007). Nos estados de Rondônia e Mato Grosso, Santos e Alleoni (2012), relataram teores médios de P de $6,3 \text{ mg kg}^{-1}$, sendo 74% do solos classificados com Latossolos.

Os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) foram mais elevados na camada superficial (Quadro 2), indicando a importância da ciclagem de nutrientes para a fertilidade do solo. O Ca^{2+} foi o cátion predominante em todos os solos, seguidos por Mg^{2+} e K^+ . Teores mais elevado de Ca^{2+} está relacionado à maior afinidade do Ca^{2+} pelos sítios de troca, resultando em menores perdas por lixiviação (Barros et al., 2012), quando comparado a outros cátions básicos. Em 73,7% das amostras a saturação de base foi inferior a 36%, caracterizando os solos como de caráter distrófico ou álico. Em Rondônia e Mato Grosso a m% foi de 46% com amplitude de 0,1 a 98%, onde mais de 70% dos solos classificados como Latossolos (Santos & Alleoni, 2012).

Variações nos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P e MO, indicadas pelos coeficientes de variação (CV) entre solos pertencentes a uma mesma classe se deve a coletas de solos realizadas em áreas de planície fluvial, solos antropogênicos e solos desenvolvidos sobre influência de rochas básicas que apresentam teores mais elevados de cátions básicos em contraste aos solos desenvolvidos sobre influência de rochas cristalinas que apresentam baixos teores desses cátions

A acidez potencial e saturação por alumínio foram elevadas nas duas profundidades, sendo classificadas como muito altas em Gleissolos e Cambissolos, altas em Argissolos e Plintossolos e médias em Latossolos, Nitossolos e Neossolos (Alvarez et al., 1999). Em todas as classes, a acidez potencial e a saturação por alumínio foi mais elevada na camada de subsuperfície, indicando dominância do complexo de troca pelo Al trocável e elevada pobreza dos solos em Ca^{2+} e Mg^{2+} . Em 30,2% das amostras a saturação por alumínio foi superior a 50%, considerado tóxico para maior parte das culturas. No estado do Amazonas Moreira e Fageria (2009) relataram que 76,6% dos solos

apresentaram saturação por Al^{3+} superior a 50% e atribui o distrofismo do solo ao elevado grau de intemperismo.

Quadro 2. Atributos físicos e químicos dos solos estudados na camada superficial em solos do estado do Pará.

Estat. ¹	pH H ₂ O	MO (g kg ⁻¹)	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Areia	Argila	Silte
Latosolos														
Média	4,2	17,9	4,6	0,3	5,1	2,6	13,1	49,4	21,1	13,9	62,1	572	262	166
Mín.	3,3	4,0	0,6	0,01	0,1	0,2	0,6	6,4	7,2	4,6	1,8	30	10	15
Máx.	6,4	44,6	52,9	1,6	48,9	18,6	37,9	102,6	41,3	40,2	92,2	909	729	883
CV (%)	17	55	161	149	149	119	76	43	43	81	77	45	75	119
C. Fert. ²	MB	B	MB	MB	B	B	A	M	B	B	B	-	-	-
Argissolos														
Média	4,1	14,8	5,9	0,2	13,5	1,9	13,0	51,4	28,6	23,3	45,5	756	161	83
Mín.	3,5	5,1	0,8	0,03	0,1	0,2	1,2	17,2	7,6	1,9	3,4	589	63	14
Máx.	4,9	25,1	27,4	1,1	101,0	7,1	40,9	179,3	47,9	37,9	95,9	866	263	147
CV (%)	11	42	96	127	207	77	84	70	55	87	77	15	50	50
C. Fert.	MB	B	MB	MB	B	B	A	A	B	B	B	-	-	-
Nitossolos														
Média	5,0	20,0	2,5	0,4	35,6	9,1	4,9	36,7	50	55,1	9,8	187	693	120
Mín.	4,1	18,1	1,1	0,1	0,9	1,9	0,1	27,4	16,7	9,5	0,1	89	539	63
Máx.	6,1	21,4	3,6	0,9	64,7	13,3	13,8	53,8	77,0	59,5	82,6	284	848	177
CV (%)	21	9	52	112	91	69	158	41	61	84	169	74	31	67
C. Fert.	B	M	MB	MB	M	M	B	M	M	M	B	-	-	-
Plintossolos														
Média	4,4	14,9	0,9	0,2	8,4	2,4	7,7	46,1	18,7	19,3	41,2	668	186	146
Mín.	4,1	15,8	0,3	0,1	3,4	2,0	6,0	39,4	11,8	12,2	11,6	634	181	116
Máx.	4,9	32,6	2,5	0,4	16,1	3,0	9,7	58,6	29,2	24,9	33,2	703	191	176
CV (%)	10	10	78	97	81	22	24	24	50	35	62	7	4	29
C. Fert.	MB	B	MB	MB	B	B	A	A	B	M	B	-	-	-
Neossolos														
Média	3,7	16,5	2,0	0,2	-	-	10,6	39,0	10,8	0,51	98,1	778	129	93
Mín.	3,6	18,5	1,9	0,19	-	-	9,8	36,1	3,1	0,52	96,2	677	880	340
Máx.	3,9	20,5	2,1	0,24	-	-	12,3	41,1	3,9	0,58	96,1	879	90	64
CV (%)	5	7	6	17	-	-	8	6	5	12	3	18	2	44
C. Fert.	MB	M	MB	MB	-	-	M	M	MB		MB	-	-	-
Gleissolos														
Média	3,8	29,0	16,2	0,9	55,4	35,7	31,3	79,0	123,3	53,8	25,4	266	190	544
Mín.	2,3	10,8	7,0	0,2	26,9	25,4	5,1	32,0	47,7	62,1	3,6	20	141	131
Máx.	4,7	55,8	35,1	1,5	117,7	40,7	107,9	198,8	170,1	44,6	63,4	727	300	785
CV (%)	24	62	72	67	76	20	138	86	47	38	101	121	40	53
C. Fert.	MB	M	MA	MB	MA	MA	MA	MA	MA	M	B	-	-	-
Cambissolos														
Média	5,0	72,0	3,1	0,3	48,5	9,7	20,0	104,5	78,5	35,9	25,5	453	401	146
Mín.	4,8	65,9	2,9	0,2	45,0	8,7	17,7	99,8	56,3	35,1	2,6	436	400	126
Máx.	5,2	78,1	3,3	0,4	52,0	10,6	22,2	109,2	64,5	36,6	8,9	471	403	165
CV (%)	5	12	8	35	10	14	18	6	10	3	28	5	1	19
C. Fert.	B	MA	MB	MB	MA	A	A	MA	A	B	MB	-	-	-

¹Estatística descritiva. ²Classificação da fertilidade de acordo com Alvarez et al. (1999): MB - Muito baixo; B - Baixo; M - Médio; A - Alto; MA - Muito alto.

A CTC apresentou valor médio entre 10,8 e 123,3 mg kg⁻¹ na camada superficial, com valores crescentes da ordem de Neossolos, Plintossolos, Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Cambissolos e

Gleissolos. Os maiores valores de CTC em Gleissolos provavelmente se deve ao acúmulo de CO e sedimentos transportados pelos rios da bacia Amazônica e em Cambissolos e Nitossolos pela mineralogia derivada de basalto e diabásio que apresentam teores elevados de cátions básicos (Falesi, 1986; Soares et al., 2005). Em estudos de solos na Amazônia Ocidental, Lima et al. (2006) observaram que os solos situados em áreas de várzeas são geralmente eutróficos, em contraste com os solos de terra firme, que são de baixa fertilidade.

A análise granulométrica revelou heterogeneidade na distribuição das partículas, em geral a fração areia foi a principal constituinte do solo nas duas profundidades, com exceção dos Nitossolos que apresentaram predominância de argila (Quadro 4 e 5). O teor de argila aumentou com a profundidade em todas as classes de solos, exceto nos Gleissolos e Cambissolos. A classificação textural variou entre argilo-arenosa para Latossolos, Argissolos e Plintossolos, Cambissolos e Gleissolos, argilosa em Nitossolos e arenosa em Neossolos.

Os teores dos óxidos de Al, Si, Fe, Ti e Mn extraídos por ataque sulfúrico variaram entre as classes de solos e com a profundidade (Quadro 4 e 5). Os maiores teores ocorreram em subsuperfície, com exceção de Mn que foi mais elevado em superfície, por outro lado os Neossolos apresentaram as menores médias entre as formas de óxidos avaliados para todas as classes de solos.

Os SiO_2 e de Al_2O_3 tiveram distribuição semelhantes, com teores mais elevados em Nitossolos e Latossolos e menores para Plintossolos, Neossolos e Gleissolos (Quadro 4 e 5). Menores teores de óxidos em Plintossolos e Gleissolos podem estar relacionados ao hidromorfismo nesses ambientes, com remoção dos elementos no perfil (Rosolen & Herpin, 2008) e os maiores teores em Latossolos e Nitossolos refletem caráter mais oxidico dessas classes. Teores menores de SiO_2 , quando comparados com os de Al_2O_3 reflete os baixos valores de Ki e revela maior solubilização e perda de Si no perfil do solo (Corrêa et al., 2003; Melo et al., 2010), o que favorece a formação de minerais secundários como caulinita. Teores de óxidos de Al e Si maiores em Latossolos em relação a Cambissolos podem estar relacionado à mineralogia do material de origem e/ ou, maior grau de intemperismo dos Latossolos em relação ao Cambissolos (Pereira et al., 2010).

Os teores totais de Fe_2O_3 e TiO_2 tiveram comportamento semelhante, maiores em Nitossolos e Cambissolos e teores baixos em Neossolos, Plintossolos e Gleissolos (Quadro 4 e 5). Os teores de óxidos de Fe tendem a apresentar maiores valores em solos desenvolvidos sobre influência de rochas básicas em relação aos solos derivados de rochas ácidas (Kabata-Pendias, 2010). Os solos do estado do Pará 2,2% dos solos são da Formação Penatecaua que originaram os Nitossolos e Argissolos Vermelhos com teores elevados de óxidos de ferro e 50% são da Formação Alter do Chão com litologia de argilito, arenito e siltito, que apresentam baixos teores desses óxidos (Rodrigues et al., 2007). Baixos teores de óxidos de Fe e Ti em Plintossolos e Gleissolos sugere

baixos teores no material de origem e condições do pedoambiente, como de hidromorfismo, que atua na redução do Fe e Ti (Campos et al., 2012).

Quadro 3. Atributos físicos e químicos dos solos estudados camada de subsuperficial em solos do estado do Pará.

Estat ¹ .	pH H ₂ O	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	m	Areia	Argila	Silte
		g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mmolc kg ⁻¹				%		g kg ⁻¹				
Latosolos														
Média	4,7	10,8	2,3	0,02	10,9	2,2	7,5	25,7	20,62	33,8	36,4	474	410	116
Mín.	3,8	4,7	0,01	0,01	0,1	0,2	0,3	9,8	3,0	1,8	0,9	280	106	2
Máx.	6,0	15,8	27,5	1,2	48,9	15,1	23,1	68,0	60,3	85,2	89,9	871	931	716
CV	13	23	189	158	149	160	81	47	96	138	52	48	56	134
C. Fert ² .	B	B	B	MB	B	B	M	B	B	MB	B	-	-	-
Argissolos														
Média	4,4	9,1	0,9	0,1	1,3	0,8	11,0	26,0	13,2	7,8	83,3	565	368	67
Mín.	4,0	6,5	0,01	0,001	0,2	0,1	5,6	14,8	5,9	0,6	74,6	331	176	21
Máx.	5,1	11,2	6,6	0,3	2,2	2,2	24,7	43,2	27,3	19,2	88,5	776	610	149
CV	8	14	19	111	55	80	52	32	51	80	9	26	38	59
C. Fert.	MB	B	MB	MB	MB	MB	A	M	B	MB	MA	-	-	-
Nitossolos														
Média	4,6	10,2	1,5	0,2	21,5	8,8	3,2	31,3	33,7	49,4	9,5	119	800	81
Mín.	4,2	9,3	1,1	0,01	1,7	1,4	0,9	28,8	6,4	4,0	2,8	71	737	66
Máx.	4,9	11,2	2,0	0,2	38,5	16,1	6,0	33,8	46,0	60,8	78,1	167	862	96
CV	10	13	37	12	185	119	83	11	107	124	137	57	11	26
C. Fert.	B	B	MB	MB	M	M	B	M	M	B	M	-	-	-
Plintossolos														
Média	4,4	6,4	1,3	0,01	0,3	0,3	11,6	25,5	12,2	2,3	95,1	577	292	131
Mín.	4,3	5,3	0,3	0,01	0,1	0,2	9,9	19,2	10,1	0,9	85,1	553	241	105
Máx.	4,5	7,4	2,5	0,02	0,5	0,4	18,2	35,8	13,4	5,3	91,5	603	342	157
CV	4	24	99	74	90	47	61	39	20	93	10	6	25	28
C. Fert.	B	B	MB	MB	MB	MB	A	M	B	MB	MA	-	-	-
Neossolos														
Média	4,1	9,2	5,2	0,04	-	-	4,9	26,7	4,9	0,2	99,4	741	162	97
Mín.	3,9	8,1	1,8	0,01	-	-	4,5	23,1	4,5	0,1	89,1	691	113	96
Máx.	4,4	10,2	7,5	0,05	-	-	7,3	28,2	5,3	0,3	95,6	791	212	98
CV	9	16	60	17	-	-	32	8	11	13	20	10	43	1
C. Fert.	MB	B	B	MB	-	-	M	M	B	MB	MA	-	-	-
Gleissolos														
Média	3,5	30,9	11,7	0,7	45,2	29,0	85,4	148,7	160,3	33,5	53,3	313	171	516
Mín.	2,3	10,2	0,7	0,2	16,4	17,9	7,1	30,4	86,0	18,8	4,7	470	910	100
Máx.	4,8	60,5	28,7	1,4	115,3	38,5	233,4	338,4	312,0	82,6	74,8	809	299	783
CV	38	79	106	76	90	31	122	96	54	60	81	115	54	57
C. Fert.	MB	M	A	B	MA	MA	M	MA	MA	M	M	-	-	-
Cambissolos														
Média	4,9	76,7	5,7	0,2	16,4	2,8	5,1	136,0	24,5	12,5	20,81	489	345	166
Mín.	4,7	65,9	2,9	0,02	15,6	2,1	2,9	120,8	20,8	10,6	13,7	439	296	166
Máx.	5,0	87,4	7,5	0,4	17,2	3,4	9,3	161,2	25,1	11,4	14,0	539	396	175
CV	5	20	68	38	10	33	49	15	10	5	1	15	20	1
C. Fert.	B	MA	M	MB	M	B	M	MA	MA	MB	B	-	-	-

¹Estatística descritiva. ²Classificação da fertilidade de acordo com Alvarez et al. (1999): MB - Muito baixo; B - Baixo; M - Médio; A - Alto; MA - Muito alto.

Os MnO apresentaram comportamento semelhantes entre as formas de extração de óxidos de Mn e entre as classes de solos. Os teores foram baixos e foram menores na camada subsuperficial. Baixos teores de óxidos de Mn podem estar condicionados a pobreza de Mn no material de origem

e a dinâmica do manganês em função do regime hídrico, que promove a redução e remoção do Mn do sistema (Dowding & Fey, 2007). Gonçalves et al. (2011) relataram maior concentração de óxidos de Mn em solos oriundos de basalto quando comparados a solos oriundo de granito e arenito.

Os teores dos óxidos de Fe e Al, extraídos por oxalato de amônio, distribuíram-se com certa uniformidade entre as classes de solos e entre as camadas, apresentando valores mais baixos em Neossolos e Plintossolos. Os maiores teores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 amorfos na camada superficial estão associados aos maiores teores de MO nesta camada (Quadro 2), uma vez que a fração orgânica inibem a cristalização dos óxidos (Melo et al., 2010).

Os teores de ferro livre (Fe_{DCB}) foram altos em todas as classes de solos, com exceção de Cambissolos e Neossolos que apresentaram menos de 30% de ferro na forma pedogênico. Essa amplitude evidência a diversidade de material de origem. Os maiores teores foram para os solos desenvolvidos de basalto e menores teores para o solo originado de embasamento cristalino, revelando teores mais elevados de ferro cristalinos em solos com maior desenvolvimento pedogenéticos (Jiang et al., 2011).

Teores elevados de ferro livre indica maior contribuição de minerais secundários no teor de Fe total do que óxidos de Fe litogênico (Alleoni & Camargo, 1995). Teores mais elevados de óxidos de Fe_{DCB} foram em Latossolos e Nitossolos representando 51,8 e 65%, respectivamente, de ferro livre em relação ao teor total. Esses resultados indicam maior grau de evolução e o caráter mais oxidico dessas classes de solos (Melo et al., 2006). Em Roraima, Melo et al. (2010) relataram teores médios de Fe_{DCB} para Nitossolos de $58,3 \text{ g kg}^{-1}$, e atribui os teores elevados ao material de origem desenvolvidos sob rochas máficas.

As relações K_i e K_r foram baixas, indicando estágio avançado de intemperismo e presença de argila de baixa atividade, comum em solos altamente intemperizados (Soares & Alleoni, 2008) como os solos da Amazônia. Valores de $K_i > 1$ sugere predominância da caulinita, enquanto que $K_i < 1$ sugere dominância da fração oxidica, e valores de $K_i > 2$ indica a presença tanto de caulinita quanto de minerais 2:1 (Soares et al., 2005). Os Cambissolos apresentaram menor valor de K_i com mineralogia oxidica (Tabela 4 e 5). Por outro lado, os Gleissolos tiveram maiores valores de K_i , e a mineralogia dominada pela caulinita, muscovita e ilita (Figura 3 e 4). Esses resultados estão em consonância com os apresentados por Soares et al. (2005), Santos e Alleoni (2012) e Falesi (1986.)

As formas de ferro livres (Fe_{DCB}) predominaram sobre as amorfas refletindo o maior grau de cristalinidade dos óxidos de Fe. A relação Fe_o/Fe_d foi baixa e diminuiu na camada subsuperficial. O intemperismo elevado promove a cristalização dos óxidos de ferro resultando em baixas relações entre as formas amorfas e cristalinas (Kampf & Curi, 2000). Valores mais elevados em superfície

pode estar relacionado ao aporte de MO aliado ao alto teor de Al^{3+} trocável, que complexam o Fe inibindo a cristalização (Schiavo et al., 2012) o que favorece a formação de óxidos de baixa cristalinidade.

Quadro 4. Estatística descritiva dos teores de óxidos SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO e TiO_2 extraídos por ataque sulfúrico, formas amorfas de MnO , Fe_2O_3 extraídas por oxalato ácido de amônio e óxidos de Fe_2O_3 extraído por ditionito-citrato-bicarbonato e relações entre eles na camada superficial em solos do estado do Pará.

Estat. ²	Óxidos por ataque sulfúrico					Relações		OAA ³			DCB ⁴		Relações		
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	Ki	Kr	MnO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	Feo/Fed ⁶	Fed/Fet ⁶		
,g kg ⁻¹g kg ⁻¹									
Latossolos															
Média	101,1	120,7	54,4	61,6	0,9	1,5	1,1	0,3	2,1	25,9	28,2	0,2	0,6		
Mín.	12,0	24,5	7,6	4,0	0,1	0,3	0,3	0,0	0,2	9,4	1,1	0,02	0,02		
Máx.	255,0	284,7	206,4	420,4	4,1	2,9	2,5	2,6	9,2	49,5	103,2	3,00	0,7		
CV (%)	60	54	103	133	105	36	41	154	83	36	69	282	22		
Argissolos															
Média	84,1	87,6	31,5	35,5	0,9	1,6	1,3	0,1	2,1	21,4	13,3	0,2	0,6		
Mín.	7,0	29,6	7,6	4,0	0,01	0,4	0,3	0,01	0,2	5,4	4,6	0,03	0,2		
Máx.	300,0	261,5	131,4	116,6	4,2	2,2	1,9	0,6	5,6	40,8	30,2	0,5	1,6		
CV (%)	73	61	87	80	124	26	28	172	66	48	54	73	68		
Nitossolos															
Média	187,7	164,4	182,3	302,7	4,7	2,0	1,1	1,5	9,6	16,9	118,5	0,1	0,7		
Mín.	156,0	134,6	139,0	258,4	3,5	1,7	1,1	0,1	7,1	9,8	107,5	0,1	0,6		
Máx.	214,0	215,2	221,4	388,2	6,1	2,4	1,2	3,5	12,5	26,2	129,0	0,1	0,9		
CV (%)	16	27	23	25	28	20	4	117	28	50	9	26	24		
Plintossolos															
Média	45,7	68,9	21,4	24,1	0,3	1,0	0,9	0,2	2,2	5,5	10,2	0,2	0,6		
Mín.	13,0	52,0	10,3	10,9	0,2	0,4	0,4	0,1	1,9	5,2	8,4	0,2	0,3		
Máx.	79,0	85,6	35,7	31,2	0,4	1,6	1,2	0,5	2,8	5,9	11,5	0,3	0,8		
CV (%)	72	24	61	48	31	56	51	105	24	7	16	23	45		
Neossolos															
Média	11,8	14,2	5,8	16,8	0,2	1,4	1,1	0,03	0,3	7,0	1,6	0,2	0,3		
Mín.	8,3	10,3	4,6	11,8	0,2	1,0	0,8	0,01	0,1	4,8	1,1	0,1	0,2		
Máx.	16,1	18,6	7,7	22,1	0,3	2,7	0,9	0,05	0,6	9,2	2,4	0,4	0,5		
CV (%)	34	29	28	31	27	61	8	65	69	31	41	78	51		
Gleissolos															
Média	92,8	66,1	26,2	37,1	3,4	2,4	2,0	0,3	2,4	17,0	12,5	0,2	0,6		
Mín.	48,0	37,2	9,1	26,1	0,2	1,2	1,1	0,1	0,5	9,7	4,3	0,1	0,2		
Máx.	142,0	90,3	48,1	48,9	7,1	3,6	2,8	0,7	3,4	24,8	18,6	0,3	1,4		
CV (%)	42	38	55	25	100	35	31	92	54	41	41	38	79		
Cambissolos															
Média	42,8	116,9	295,8	117,7	4,4	0,6	0,3	0,3	2,6	27,8	57,7	0,04	0,2		
Mín.	33,7	99,5	260,2	110,2	2,8	0,5	0,3	0,2	1,3	19,3	50,1	0,03	0,17		
Máx.	59,0	133,3	325,3	124,9	6,4	0,9	0,4	0,4	3,9	35,3	63,1	0,06	0,23		
CV (%)	33	15	11	62	41	32	17	28	50	29	12	41	16		

¹Estatística descritiva. ²formas de baixa cristalinidade extraídas por oxalato ácido de amônio. ³Formas cristalinas extraídas por ditionito-citrato-bicarbonato. ⁴relação entre teores de Fe amorfo e Fe cristalino; ⁵relação entre teores de Fe por ditionito-citrato-bicarbonato e Fe por ataque sulfúrico.

A relação Fed/Fet foram maiores em subsuperfície e estão condizentes como os teores de óxidos de Fe nessa camada. Valores altos nessa relação foram observados em Argissolos, Nitossolos e Plintossolos, indicando um maior grau de intemperismo dessas classes de solos e um

pedoambiente mais desenvolvido em relação aos Neossolos e Cambissolos que apresentaram valores mais baixos de Fed/Fet. Valores altos dessa relação sugerem que o Fe presente no sistema encontra-se, principalmente, na constituição de minerais secundários (Alleoni & Camargo, 1995; Santos et al., 2010). Analisando solos de topossequência no Amazonas Campos et al. (2012) relataram variação na relação Fed/Fet de 0,36 a 0,93 em Latossolos e Neossolos respectivamente.

Quadro 5. Teores de óxidos SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, MnO e TiO₂ por ataque sulfúrico, formas amorfas de MnO, Fe₂O₃ por oxalato ácido de amônio e óxidos de Fe₂O₃ por ditionito-citrato-bicarbonato e relações entre eles na camada subsuperficial em solos do estado do Pará.

Estat. ²	Óxidos por ataque sulfúrico					Relações		OAA ³			DCB ⁴		Relações	
	SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Ki	Kr	MnO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Feo/Fed ⁵	Fed/Fet ⁶	
g kg ⁻¹g kg ⁻¹								
Latossolos														
Média	133,4	143,3	74,4	97,5	2,1	1,5	1,2	0,2	2,1	20,5	40,1	0,1	0,6	
Mín.	22	43,3	7,4	12,2	0,1	0,9	0,5	0,01	0,3	4,8	1,4	0,01	0,1	
Máx.	268	313,3	214	393,2	6,5	2,2	2,0	2,3	6,6	48,2	117,5	0,4	0,9	
CV (%)	51	47	90	101	106	23	32	212	91	51	77	105	35	
Argissolos														
Média	117,7	129	37,9	69	1,2	1,5	1,3	0,1	2,2	25,5	25,3	0,1	0,8	
Mín.	45	70,1	14,9	24,2	0,1	1,1	0,9	0,0	0,3	13,7	12,9	0,02	0,4	
Máx.	207	223,1	123,4	174,5	4,4	2,0	1,8	0,6	5,0	50	53	0,2	0,9	
CV (%)	49	41	80	57	124	16	22	145	64	40	50	62	19	
Nitossolos														
Média	218,5	213,7	176,1	263,8	2,9	1,7	1,1	1,6	7,7	20,4	134	0,1	0,8	
Mín.	198	191,2	152,3	247	0,8	1,7	1,1	1,1	4,9	20,1	124,7	0,03	0,7	
Máx.	239	236,1	199,9	280,6	5,0	1,8	1,2	2,2	10,4	21,1	143,3	0,1	0,8	
CV (%)	13	15	19	9	72	2	3	49	36	3	7	42	7	
Plintossolos														
Média	71,5	81,5	11,7	41,8	0,2	1,5	1,4	0,1	1,4	21,8	9,7	0,1	0,8	
Mín.	70	78	10	39	0,02	0,8	0,5	0,1	1,1	19,6	9,3	0,1	0,6	
Máx.	73	85	13,4	44,5	0,6	2,5	2,2	0,1	1,7	24,6	10	0,2	1,2	
CV (%)	3	6	21	9	18	3	4	34	23	12	4	22	37	
Neossolos														
Média	26,5	42,1	6,3	27,5	4,8	1,1	1,0	0,03	0,1	7,0	4,4	0,02	0,5	
Mín.	25	39	5,8	27	4,1	0,1	0,6	0,01	0,01	6,3	3,9	0,01	0,4	
Máx.	28	45,1	6,7	28	5,3	1,8	1,3	0,05	0,7	7,5	5,1	0,02	0,6	
CV (%)	8	10	10	3	13	2	4	7	43	9	14	31	37	
Gleissolos														
Média	110,8	71,7	34,1	43,4	2,7	2,6	2,0	0,5	2,2	20	19	0,1	0,6	
Mín.	54	42,5	15,4	31,2	0,3	2,2	1,7	0,1	0,9	12,1	10	0,1	0,5	
Máx.	177	100,9	50,3	57,1	6,7	3,1	2,4	1,3	3,4	38,7	28,7	0,2	0,7	
CV (%)	49	43	54	28	110	19	17	106	49	63	44	3	16	
Cambissolos														
Média	65,5	135,1	249,3	159,1	0,4	0,8	0,4	0,2	2,7	32,6	125,3	0,3	0,5	
Mín.	63	130,1	239,5	154	0,2	0,3	0,1	0,1	1,8	32	117,1	0,03	0,5	
Máx.	68	140	259	164,1	0,7	1,1	0,6	0,3	4,0	33,1	133,3	0,4	0,8	
CV (%)	5	5	6	5	11	0,2	9	45	43	2	7	2	7	

¹Estatística descritiva. ²formas de baixa cristalinidade extraídas por oxalato ácido de amônio. ³Formas cristalinas extraídas por ditionito-citrato-bicarbonato. ⁴relação entre teores de Fe amorfo e Fe cristalino; ⁵relação entre teores de Fe por ditionito-citrato-bicarbonato e Fe por ataque sulfúrico.

Para melhor quantificar as relações entre os atributos físicos e químicos do solo e identificar as similaridades entre as variáveis foram realizadas análises de agrupamento hierárquico (AAH) e análise de componente principal (ACP) (Figura 2 e 3). Com AAH foi possível a formação de dois grupos na camada superficial (Figura 2a), o primeiro grupo foi formado pelo pH, MO, P, Ca, Mg, MnO AS, K, Fe_{OAA} e Fe_{DCB}, Al e H+Al.

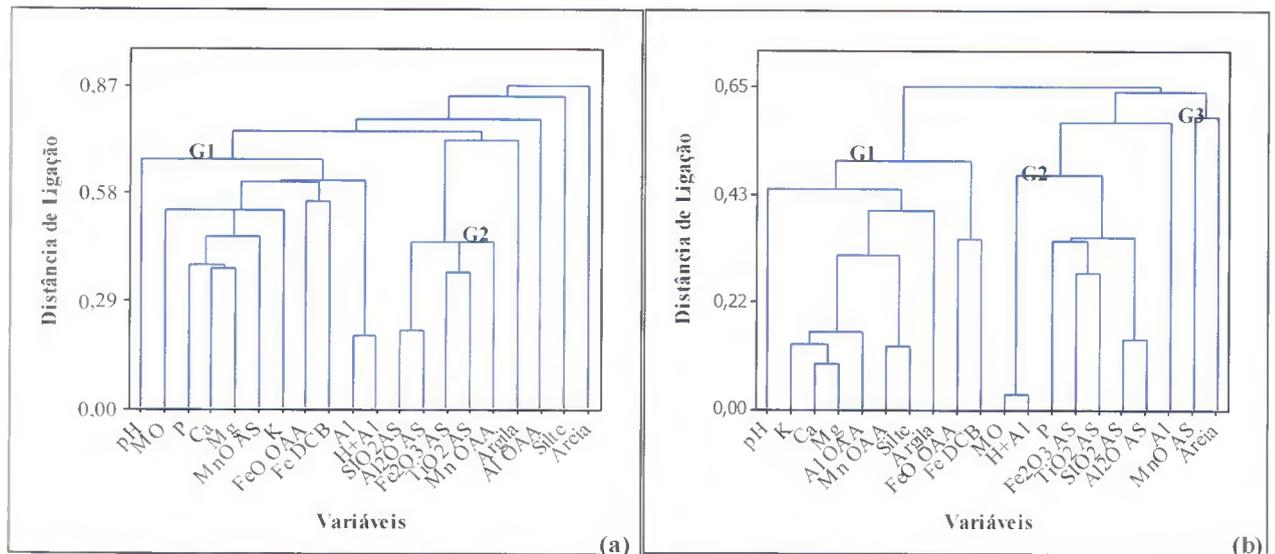


Figura 2. Análise de Cluster dos atributos físicos e químicos dos solos do estado do Pará, na camada superficial (a) e na camada de superficial (b).

Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ apresentaram uma maior similaridade com P, MnO em comparação aos outros atributos, por outro lado, Al³⁺, H+Al e o pH apresentaram menor similaridade com os atributos do primeiro grupo. A acidez potencial e o pH apresentaram comportamento oposto em relação aos cátions básicos, comprovando que o aumento da acidez diminui a disponibilidade de nutrientes no solo (Silva et al., 2010). Estes resultados estão em consonância com os encontrados por Silva-Cruz et al. (2011) no estado do Ceará e Silva & Lima (2012) em Minas Gerais que relataram comportamento inversamente proporcional entre o pH e a acidez sugerindo baixa fertilidade do solo e a predominância do Al³⁺ no complexo de sortivo.

O segundo grupo foi formado pela argila, óxidos Si, Al, Fe e Ti extraídos pelo ataque sulfúrico, Mn por oxalato e argila, mostrando a forte relação entre esses atributos, devido o comportamento geoquímico semelhante e possível substituição isomórfica entre esses elementos durante a pedogênese e origem comum (Burak et al., 2010).

Em relação a camada de subsuperfície observou-se a formação de 3 grupos (Figura 2b). O primeiro grupo formado pH, K, Ca, Mg, Al, silte, argila e Mn_{OAA}, Al_{OAA} e Fe nas formas amorfas e cristalinas. Esse grupo representa a fertilidade do solo, principalmente em termos de

macronutrientes, e a granulometria, sugerindo que a argila seja a principal responsável pela CTC em subsuperfície. O segundo grupo foi formado pela MO, H+Al, P, os óxidos de Fe, Ti, Si, Al, o Al trocável. A similaridade entre o P e os óxidos pode estar relacionada a capacidade desses solos em reter P, principalmente pelo baixo teor de MO (Barbieri et al., 2009) em profundidade, refletindo a pouca mobilidade e baixa solubilidade de P em solos ácidos e com teores elevados de óxidos de Fe e Al, como os solos em estudo. O terceiro grupo foi formado pela areia e MnO_{AS} , com menor similaridade entre os grupos formados.

A ACP complementou a análise de agrupamento nas duas profundidades estudada (Figura 3). Na camada superficial as duas componentes principais, PC1 e PC2 explicam 71,02% da variabilidade nas propriedades do solo (Figura 3a). A PC1 explicou 51,09% da variância total e a PC2 explicou 19,93%. A primeira componente foi caracterizada pelas variáveis H+Al, m%, MnO_{AS} , P, MO, CTC, Ca, Mg, SB, MO, K, enquanto a segunda componente pelo Al trocável, os óxidos de Si, Ti, Fe, Mn, pH, V%. A m% apresentou carga positiva na primeira componente, enquanto a Ca, Mg H+Al, MnO_{AS} , P, MO, CTC, Ca, Mg, SB, MO, K, e SB tiveram carga negativa. O comportamento inversamente proporcional entre a m% e as outras variáveis está de acordo com princípios de química do solo (Raij, 2011) e estão em consonância com os apresentados por Moreira et al. (2009) em solos na Amazônia.

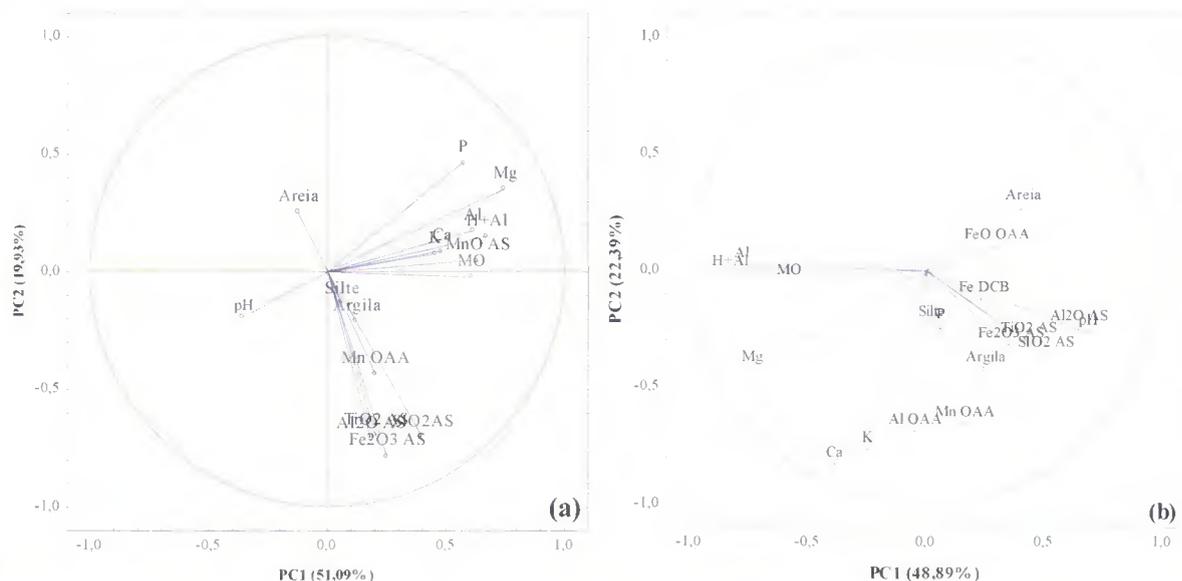


Figura 3. Análise de componentes principais (PC1 e PC2) dos atributos físicos e químicos dos solos do estado do Pará, na camada de superfície (a) e a camada de subsuperfície (b).

Em relação subsuperfície, verificou-se que as duas primeiras componentes apresentaram variância que explica 71,28% da variabilidade total dos dados, sendo 48,89% para a primeira componente e 22,39% para a segunda componente (Figura 3b). Os atributos que contribuíram

positivamente com a PC1 foram areia, pH, óxidos de Fe, Al, Ti e Si e negativamente foram: Mg^{2+} , MO, alumínio trocável e acidez potencial. Para a segunda componente os óxidos de Al e Mn amorfos, Ca^{2+} e K^+ e a argila contribuíram com cargas positivas. A dispersão das variáveis na ACP sugere a heterogeneidade das amostras nas diferentes classes de solos, enquanto a sobreposição ou aproximação dos autovetores sugere a influência de uma variável sobre a outra.

2.4 CONCLUSÕES

1. Os solos do estado do Pará apresentam acidez elevada com valores de pH, em média, muito baixo. A saturação por base foi baixa e a saturação por alumínio alta indicando caráter distrófico ou álico em Latossolos, Argissolos, Plintossolos e Neossolos.
2. Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ foram mais altos na camada superficial em relação a camada de subsuperfície. O teor de P foi baixo em todas as classes de solos com exceção de Gleissolos.
3. Os teores de óxidos de Fe e Al foram elevados em todas as classes de solos. Os óxidos de Fe foram mais altos em Nitossolos e Cambissolos e os óxidos de Al foram mais altos em Latossolos e Argissolos revelando solos mais intemperizados.

LITERATURA CITADA

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. 24-25 P.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. Acta. Amaz. 41: 103-114, 2011.

BARBIERI, D. M.; JÚNIOR, J. M.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUJO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. Sci. agric. 66:819-826, 2009.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L. P.; KERN, D. C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. Rev. Cienc. Agrar. 55: 44-51, 2012.

BENEDETTI, U. G.; JÚNIOR, J. F. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P. Gênese, química e mineralogia de solos derivados de sedimentos pliopleistocênicos e de rochas vulcânicas básicas em Roraima, Norte Amazônico. R. Bras. Ci. Solo, 35:299-312, 2011.

BURAK, D. L.; FONTES, M. P.F.; SANTOS, N. T.; MONTEIRO, L. V. S.; MARTINS, E. S.; BECQUER, T. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. Geoderma 160:131-142.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, (IAC, Boletim Técnico, 106).1986. 94p

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA, V. S. J.; RIBEIRO, M. R. F.; ALMEIDA M. C. Relações solo-superfície geomórfica em uma topossequência várzea-terra firme na região de Humaitá (AM). R. Bras. Ci. Solo, 36:325-336, 2012.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e água subterrâneas no Estado de São Paulo, São Paulo: CETESB, 2001. p. 247.

DOWDING, C. E.; FEY, M. V. Morphological, chemical and mineralogical properties of some manganese-rich oxisols derived from dolomite in Mpumalanga province, South Africa. Geoderma, 141: 23–33, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo, Rio de Janeiro, 1997.

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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Pará. ed. Belém, PA, Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 262p.

FALESI, I. C. Solos da Rodovia Transamazônica. Belém: IPEAM. Boletim Técnico. n 55. 1986. p 196.

FARELLA, N.; DAVIDSON, R.; LUCOTTE, M.; DAIGLE, S. Nutrient and mercury variations in soils from family farms of the Tapajos region (Brazilian Amazon): Recommendations for better farming. Agric. Ecosyst. Environ. 120: 449–462, 2007.

HAIR JR, J. P.; ANDERSON, R. E. TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Análise de Multivariada de dados. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 593 p.

IBRAIMO, M. M. et al. Gênese e micromorfologia de solos sob vegetação xeromórfica (caatinga) na região dos Lagos (RJ). Rev. Bras. Ciênc. Solo. 28: 695-712, 2004.

JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: advanced course. Madison: University of Wisconsin, 1969. 991p.

JIANG J.; XU, R. K.; ZHAO, A. Z. Comparison of the surface chemical properties of four soils derived from Quaternary red earth as related to soil evolution. Catena, 80: 154–161, 2010.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Rev. Bras. Ciênc. Solo, 3:1-54, 2003.

- KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H. & SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.107-138.
- LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma toposeqüência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. R. Bras. Ci. Solo, 30: 59-68, 2006.
- LOEPPERT, R. L.; INSKEEP, W. P. Iron In: BIGHAM, J. M. Methods of soil analysis, Soil Science Society of America. American Society of Agronomy, 1996. p.639-664.
- MARESCHAL, L; NZILA, J.D.D.; TURPAULT, M.P.; THONGO M'BOU, A.; MAZOUNBOU, J.C.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J.; LACLAU, J.P. Mineralogical and physico-chemical properties of Ferralic Arenosols derived from consolidated Plio-Pleistocenic deposits in the coastal plains of Congo. Geoderma, 162: 159-170, 2011.
- MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; JUNIOR, O. F. C.; BATISTA, S. M.; AFONSO, M. A. C. B. Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. Acta Amaz. 40: 1-2, 2010.
- MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, L.E. F.; CHAGAS, A. C.; JÚNIOR, J. B. L.; ANDRADE, R. P. Caracterização física, química e mineralógica de solos da colônia agrícola do Apiaú (Roraima, Amazônia), sob diferentes usos e após queima. Rev. Bras. Ciênc. Solo, 30: 1039-1050, 2006.
- MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G.R.; UCHÔA, S. C. P. Indian land use in the Raposa-Serra do Sol Reserve, Roraima, Amazonia, Brazil: Physical and chemical attributes of a soil catena developed from mafic rocks under shifting cultivation. Catena 80:95-105, 2010.
- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FONTES, L.E.F.; CHAGAS, A.C.; LEMOS JÚNIOR, J.B.; ANDRADE, R.P. Caracterização física, química e mineralógica de solos da Colônia Agrícola do Apiaú (Roraima, Amazônia) sob diferentes usos e após queima. R. Bras. Ci. Solo, 30:1039-1050, 2006.
- MOREIRA, A.; FAGERIA N. K. Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. Comm. Soil Sci. Plant Anal.40: 2912-2925, 2009.
- MOREIRA, F. M. S.; NÓBREGA, R. S. A.; JESUS, E. C.; FERREIRA, D. F.; PÉREZ, D. V. Differentiation in the fertility of Inceptisols as related to land use in the upper Solimões river region, western Amazon. Sci. Total Envi.408:349-355, 2009.
- MÜLLER, T.; HÖPER, H. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications. Soil Biol.Biochem.36:877-888, 2004.
- PEREIRA, T. T. C.; KER, J.C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; ALMEIDA, C. C. Gênese de Latossolos e Cambissolos desenvolvidos de Rochas pelíticas fazer grupo Bambuí - Minas Gerais . Rev. Bras. Ciênc. solo, 34: 1283-1295, 2010.

QUESADA, C. A.; LOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, E. C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the rainfor sites. *Biogeosciences*, 6:3851–3921, 2009.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

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

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. C.; SILVA, B. N. R.; SILVA, J. M. L.; VALENTE, M. A.; DARIVA, T. A.; SOUTO DE JESUS, A. A.; VENTURIERI, A. Caracterização, mapeamento e classificação dos solos da área de influência da BR-163 (Cuabá-Santarém) e da BR-230 (Transamazônica), no Estado do Pará. In: Embrapa Amazônia Oriental, ed. Zoneamento-Ecológico Econômico da área de influência da rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém). Belém, PA., 2007. P. 403-571.

ROSOLEN, V.; HERPIN, U. Expansão dos solos hidromórficos e mudanças na paisagem: um estudo de caso na região Sudeste da Amazônia Brasileira. *Acta Amaz.* V. 38, P. 483-490, 2008.

SANTOS, A. C.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C; BERNINI, T. A.; COOPER, M; NUMMER, A. R; FRANCELINO, M R. Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de mar de morros do médio Vale do Paraíba do Sul, RJ. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 34, 1297-1314, 2010.

SANTOS, S. N.; ALLEONI, L. R. F. Reference values for heavy metals in soils of the Brazilian agricultural frontier in Southwestern Amazônia. *Environ. Monit. Assess.* 2012.

SCHIAVO, J. A.; DIAS NETO, A. H.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; SEGRETTI, M. L.; PESSENDA, L. C. R. Characterization and Classification of Soils in the Taquari River Basin - Pantanal Region, State of MatoGrosso do Sul, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:697-707, 2012.

SILVA CRUZ, J.; ASSIS JUNIOR, R. N; ROCHA MATIAS, S. S.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Spatial variability of an Alfisol cultivated with sugarcane. *Cienc. Inv. Agr.* 38: 155-164, 2011.

SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 1999. 370p.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humicrhodichapludox under coffee cultivation. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 36: 467-474, 2012.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; TEIXEIRA, M. M.. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 34:15-22, 2010.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R.F.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M. Mineralogy and ion exchange properties of the particle size fractions of some Brazilian soils in tropical humid areas. *Geoderma*, 125:355–367, 2005.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R.F.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M. Mineralogy and ion exchange properties of the particle size fractions of some Brazilian soils in tropical humid areas. *Geoderma*, 125:355–367, 2005.

WHITTIG, L.D.; ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 1- Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 12: 331-382, 1986.

**3 TEORES DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM SOLOS NO
ENTORNO DA RODOVIA TRANSAMAZÔNICA, AMAZÔNIA-ORIENTAL**

RESUMO

A rodovia Transamazônica é uma região de fronteira onde atividades agropecuárias, extração mineral e madeireira, além das grandes hidroelétricas são as principais atividades econômicas responsáveis por alavancar o desenvolvimento. Tais atividades levam a contaminação ambiental por elementos potencialmente tóxicos (EPTs). O monitoramento ambiental somente será possível a partir da determinação dos teores dos elementos em condições naturais. Muitos métodos de extração têm sido propostos para determinar a disponibilidade de metais nos solos, no entanto, não há um consenso sobre qual extrator seja mais adequado. Nesse estudo determinaram-se os teores de EPTs em solos no entorno da Rodovia Transamazônica após extração com DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3. Foram coletadas amostras de solos em áreas com vegetação natural na rodovia Transamazônica do estado do Pará. Foram determinados atributos químicos e granulométricos, além dos teores de Fe, Al, Mn e Ti por ataque sulfúrico, Si após ataque alcalino; óxidos mal cristalizados de Fe, Al e Mn, e Fe "livre". A solução de Mehlich 3 extraiu maiores teores de Fe, Al e Pb, em relação a Mehlich 1 e DTPA-TEA e teores semelhantes para Cd, Mn, Zn e Cu. Correlações significativas foram estabelecidas entre os teores dos EPTs e dos óxidos de Fe e Mn, além do carbono orgânico e capacidade de troca de cátions. Teores de Cu, Mn, Fe e Zn extraídos pelos três métodos foram positivamente correlacionados, indicando similaridade nas formas extraídas.

Termos de indexação: Metais pesados, métodos de extração, solos da Amazônia

SUMMARY

The Highway Transamazon is a frontier region where agricultural activities, mining and wood extraction, beyond big hydroelectric plants are the main economic activities responsible for leveraging development. These activities lead to environmental contamination by potentially toxic elements (PTEs). Environmental monitoring will only be possible by the determination of element contents in natural conditions. Several extraction methods have been proposed to determine the availability of metals in soils, however, there is no consensus about what is most appropriate extractor. In this study we determined the contents of PTEs in soils at the surrounding Highway Transamazon after extraction with DTPA-TEA, Mehlich 1 and Mehlich 3. Soil samples were collected in areas with natural vegetation at the highway Transamazon from Para state. Were determined chemical and granulometric attributes, besides the content of Fe, Al, Mn and Ti by sulfuric acid attack, Si after attack alkaline; poorly crystalline oxides of Fe, Al and Mn, and "free"

Fe. The Mehlich 3 solution extracted higher contents of Fe, Al and Pb, regarding Mehlich 1 and DTPA-TEA and similar contents for Cd, Mn, Zn and Cu. Correlations were found between the contents of EPTs and oxides of Fe and Mn beyond organic carbon and cation exchange capacity. Cu, Mn, Fe and Zn extracted by the three methods were positively correlated, indicating similarity in the forms extracted.

Index terms: Heavy metals, extraction methods, Amazonian soils

3.1 INTRODUÇÃO

Os elementos potencialmente tóxicos (EPTs) ocorrem naturalmente nos solos, como resultado do intemperismo, e geralmente possuem densidade atômica maior que 6 g cm^{-3} ou número atômico maior que 20 (Alloway, 1995). Os teores naturais no solo são, a princípio, baixos. No entanto, o uso intenso e inadequado de fertilizantes e defensivos agrícolas, aliado ao aumento das atividades industriais e de mineração, tem contribuído significativamente para aumento do teor de EPTs no solo, tornando-os fontes poluidoras, cujas consequências principais são a redução de áreas agricultáveis e contaminação ambiental (Cancela et al., 2002; Kabata-Pendias & Pendias, 2010).

A contaminação do solo por EPTs depende da forma química e da concentração do elemento no solo, que pode ocorrer em formas solúveis, trocáveis, oclusas, precipitadas ou complexadas (Luo et al., 2005). Entre os elementos presentes no ambiente, os potencialmente tóxicos aos organismos e os mais comumente encontrados em casos de contaminação de solo são Ba, Mn, Fe, As, Cd, Pb, Hg, Co, Cu, Cr, Ni, Se e Zn (Conama, 2009).

Atualmente, estudos com EPTs têm sido conduzidos tomando como base os teores totais ou semitotais. Entretanto, tais teores não fornecem informações adequadas sobre o potencial risco de contaminação, pois não são todas as formas de metais presentes no solo que estão disponíveis para absorção pelos organismos (Zhang et al., 2010; Luo et al., 2012). Por outro lado, a disponibilidade depende de características do solo como teor de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC), pH, textura, teor e composição da fração argila e atividade biológica (Basar, 2009), além das características de cada metal como raio iônico, especiação química e o teor dos metais na solução.

Há vários métodos de extração dos teores de EPTs no solo, sendo que os valores médios de teores extraídos por cada método são heterogêneos. As variações são decorrentes principalmente da diversidade de solos (Fadigas et al., 2002), das diferentes soluções extratoras e análises utilizadas, o que torna inadequada a extrapolação destes valores para regiões diferentes do local de obtenção dos dados (Biondi et al., 2011) ou para comparação com soluções extratoras diferentes.

O monitoramento das formas de EPTs disponíveis depende em parte de método químico eficiente, que pode medir as frações disponíveis desses elementos. A escolha do método para análises ambientais é uma etapa decisiva no processo que visa ao diagnóstico ambiental. Entre os extratores utilizados em avaliação da disponibilidade dos EPTs para as plantas estão as soluções de ácido diluído, Mehlich 1 (Mehlich, 1953), quelantes, DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) e as soluções mista como Mehlich 3 (Mehlich 1984).

As comparações entre soluções extratoras são complexas devido às diferentes condições de solos onde são avaliados e pelo princípio de extração de cada método (Disla et al., 2010). Os extratores ácidos removem os elementos presentes em formas trocáveis da fase sólida, da solução e parte dos complexados. Os extratores que agem como complexantes extraem, predominantemente, as formas lábeis e associadas preferencialmente à matéria orgânica (Abreu et al., 2002; Menezes et al., 2010).

O estado do Pará é o segundo maior Estado da Amazônia brasileira com 1.247.950,003 km². Apresenta grande diversidade de tipos de solo e de exploração agrícola e mineral. Essas atividades têm se concentrado ao longo das rodovias federais e estaduais. No entanto, a exploração desordenada tem contribuído para alterações nos ecossistemas com perda de biodiversidade (Fearnside & Millikan, 2012). Entre as rodovias de maior expressão está a Transamazônica (BR-230).

A BR-230 atravessa o estado do Pará, no sentido Leste-Oeste, ligando-o aos estados Amazonas e o Tocantins. Essa é uma região de fronteira que, desde 1970, recebe investimento por parte do governo federal para instalação de grandes projetos como hidrelétricas, mineração, extrativismo vegetal, assentamento da reforma agrária, agricultura e pecuária, tendo nestes a principal atividade econômica. Essas atividades têm contribuído para os altos índices de desmatamento (Tourneau & Bursztyn, 2010; Fearnside & Millikan, 2012) e poluição do solo por EPTs.

O estado do Pará bem como a Amazônia como um todo apresenta ausência de estudos sobre EPTs, bem como a definição do método mais adequado para estimar a disponibilidade. Assim, o objetivo foi determinar os teores dos elementos potencialmente tóxicos em solos da rodovia Transamazônica por meio das soluções extratoras, DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3 e correlacionar com os atributos físicos e químicos dos solos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

As coletas de solos foram realizadas no entorno da Rodovia Transamazônica no estado do Pará, desde o município de São Domingos do Araguaia, na fronteira com o estado do Tocantins, até

o município de Jacareacanga, na fronteira com o estado do Amazonas (Figura 1), buscando compor um conjunto heterogêneo quanto aos atributos físicos e químicos dos solos.

O clima é equatorial do tipo Am-Aw na classificação de Köppen, com pequenas variações no Estado. As temperaturas médias anuais variam de 25 a 27°C. A precipitação anual varia entre 1.400 e 2.800 mm, sendo um período seco (agosto a dezembro) e um período chuvoso (janeiro a julho), que concentra mais de 70% da precipitação anual (Falesi, 1986; Rodrigues et al., 2009). Geologicamente, a área de influência da Transamazônica no estado do Pará está representada por litologias dos períodos Arqueanos e Pré-cambriano, Ordoviciano, Carbonífero, Jurássico, Cretáceo/Terciário e Quaternário (Rodrigues et al., 2007).

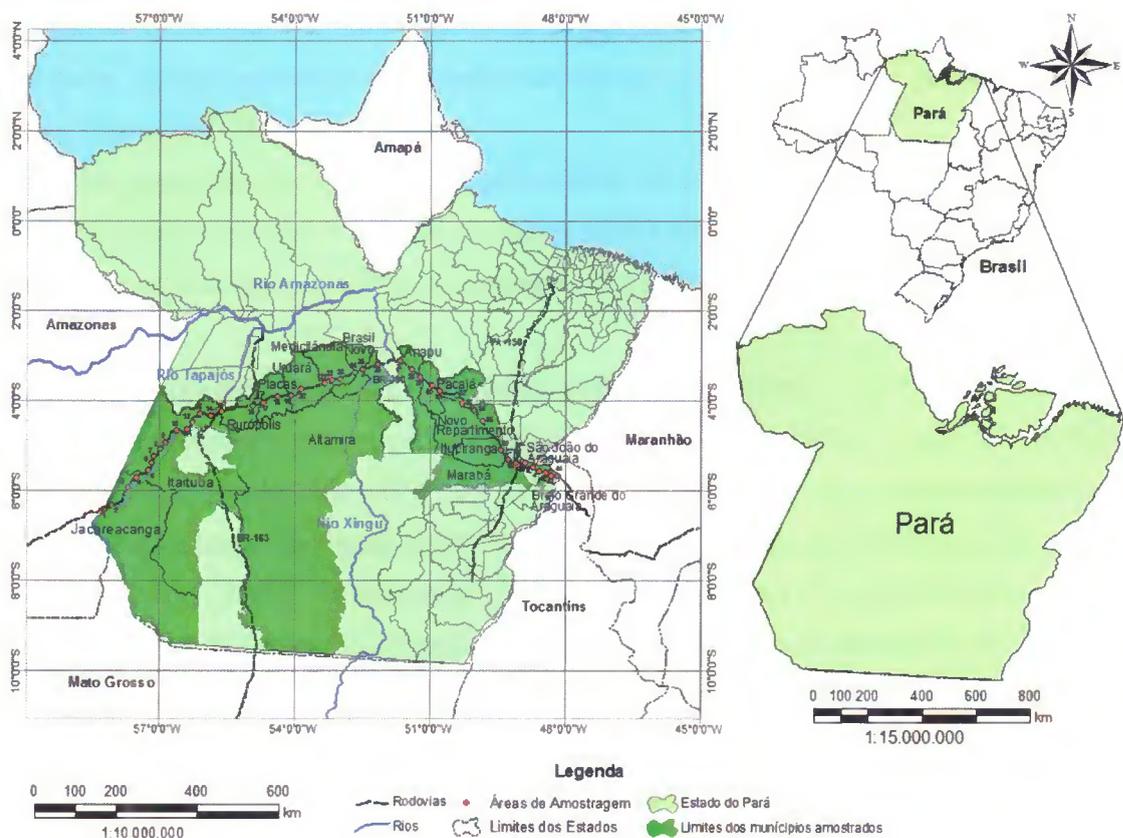


Figura 1. Mapa de localização das áreas de amostragem de solos no entorno da rodovia Transamazônica no estado do Pará.

Os solos foram classificados como Latossolos (60% da área total), Argissolos (27%), Nitossolos (2%), Plintossolos (7%), Neossolos (2%) e Gleissolos (2%). Essas classes de solos foram mapeadas e caracterizadas com base nos critérios e características diferenciais estabelecidos para enquadrá-las no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006). A classificação dos solos foi estimada com uso do programa ArcGIS 10.1 pela sobreposição dos planos de informação referente a solos na região, baseada em trabalhos desenvolvidos pelos projetos do

Zoneamento- Ecológico Econômico da área de influência da Br-163 (Cuiabá-Santarém) e Br 230 (Transamazônica) no Estado do Pará (Rodrigues et al., 2007) e Solos da Rodovia Transamazônica (Falesi, 1986). As amostras foram coletadas em áreas de vegetação primária, observando-se distância não inferior a 100 m da rodovia principal e secundárias.

Foram coletadas amostras na camada de 0,0-0,2 m, retirando-se dez subamostras simples, distantes 70 m entre si, para obtenção de uma amostra composta, sendo considerada a homogeneidade entre as amostras quanto à cor, textura do solo, topografia, drenagem e cobertura vegetal, segundo metodologia proposta por Silva (1999). Em cada área foram coletadas três amostras compostas totalizando 135 amostras em 45 áreas equidistantes, aproximadamente entre 20 a 40 km. As coletas foram realizadas com trado de aço inoxidável de acordo com procedimentos adotados pela Cetesb (2001), de forma a evitar contaminação. As amostras coletadas foram secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura de malha, obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando a solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica de alta rotação por 10 minutos. A fração argila foi separada por sedimentação; a areia por tamisação e o silte, calculado por diferença (Gee & Or (2002).

O pH foi determinado potenciométricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo: em água. O cálcio, magnésio e alumínio trocável, foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹. O Al³⁺ foi quantificado por titulometria com 0,025 M de NaOH e o Ca²⁺ e Mg²⁺ por espectrofotometria de absorção atômica (Anderson & Ingram 1992). O K⁺ e P foram extraído por Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹). O K⁺ foi determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria.

A acidez potencial (H+Al) foi extraído pela solução tamponada de acetato de cálcio 1,0 mol L⁻¹, a pH 7,0 e determinada por titulação com NaOH (Anderson & Ingram, 1992). O carbono orgânico foi quantificado por colorimetria de acordo Rajj et al. (2001) e a matéria orgânica (MO), estimada com base no carbono orgânico total. A partir dos resultados do complexo sortivo, foram calculados os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%).

Os teores dos óxidos de Si, Al, Fe, Mn e Ti expressos como óxidos (SiO_{2AS}, Fe₂O_{3 AS}, Al₂O_{3 AS}, MnO_{AS} e TiO_{AS}) foram determinados pelo o método do ataque sulfúrico, usando H₂SO₄ 1:1. Os teores dos óxidos Fe, Al e Mn foram determinados pelo espectrofotômetro de absorção atômica, Ti por colorimetria e Si por gravimetria, conforme descrito pela Embrapa (1997). Os índices de Ki e Kr que avaliam o grau de intemperismo do solo foram determinados pelas relações molares onde o Ki é calculado pela relação (Ki = 1,7 × SiO₂/Al₂O₃) e Kr (Kr = 1,7 (SiO₂/(Al₂O₃ + 0,64 Fe₂O₃)).

Os óxidos mal cristalizados (“amorfos”) de Fe_2O_3 (Fe_{OAA}), Al_2O_3 (Al_{OAA}), MnO (Mn_{OAA}) foram determinados pelo método do ácido oxálico e oxalato de amônio, os óxidos de ferro “livre” ou cristalino (Fe_{DCB}) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio ((Mehra & Jackson 1960; Loeppert & Inskeep, 1996).

Os teores disponíveis de Cd, Cr, Pb, Co, Cu, Fe, Mn, Al, Ba e Zn foram extraídos em triplicatas, utilizando três extratores: DTPA-TEA contendo $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ DTPA, $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ CaCl_2 e $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ TEA a pH 7,3 (Lindsay; Norwell, 1978). A solução extratora Mehlich 1 com $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de HCl + $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ de H_2SO_4 (Mehlich, 1984). A solução extratora Mehlich 3 contendo $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ de CH_3COOH + $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ de NH_4NO_3 + $0,015 \text{ mol L}^{-1}$ de NH_4F + $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ de EDTA (Mehlich, 1953). As determinações foram efetuadas por espectrofotometria de absorção atômica em chama (AAS), modelo Perkin-Elmer 400. Os limites de quantificação (LQ) foram calculados com as médias dos brancos analíticos de cada elemento mais o desvio padrão amostral (Inmetro, 2010).

Foi utilizada análise descritiva dos dados para determinação das medidas de tendência central e de variabilidade. Realizou-se teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Foi determinada correlação de Perason entre os teores dos EPTs, os atributos do solo e entre os métodos. Foi realizada Análise exploratória dos teores dos EPTs pela composição de gráficos “boxplot“, para identificação de valores anômalos. Aplicou-se teste de significância de Kruskal-Wallis e Kruskalmac ($p < 0,01$) para comparação dos elementos entre os métodos. Foi utilizada análise de componentes principais, no conjunto de solos, para sumarizar os valores obtidos dos atributos físicos e químicos entre as soluções extratoras. A correlação das variáveis foi atribuída ao 1º e ao 2º componentes principais (PC), de acordo o percentual da variância explicada (Hair et al., 2009).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os solos são ácidos com média de pH em H_2O de 4,2 (Quadro 1). Os teores de carbono orgânico (CO) apresentaram média de $5,9 \text{ g kg}^{-1}$, com variação de 1,4 a $17,1 \text{ g kg}^{-1}$. A distribuição não foi normal devido à ampla variação que pode ser atribuída à variabilidade dos solos. A matéria orgânica é um dos componentes do solo que mais contribuem com a CTC e com a retenção de metais, enquanto a acidez elevada favorece a presença de formas catiônicas livres, mais sujeitas à lixiviação (Campos, 2010).

A saturação de base (SB) média foi de $9,7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, considerada baixa, com amplitude de 2,9 a $76,9 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Isto sugere baixa disponibilidade de nutrientes e altos teores de Al trocável ($14,3 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), causada principalmente pelo elevado grau de intemperização (Moreira & Fageria, 2009).

Os solos apresentaram composição granulométrica com predomínio da fração areia em relação às frações finas, argila e silte. Considerando os teores médios desses constituintes, a classe textural predominante variou de argilo-arenosa a franco-argilo-arenosa.

Quadro 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos dos solos no entorno da rodovia Transamazônica no estado do Pará.

Variáveis	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV
pH H ₂ O	4,2	4,0	3,5	6,1	0,6	14,8
pHKCl	3,6	3,5	2,9	5,3	0,5	12,9
ΔpH	-0,6	-0,5	-1,7	-0,1	0,4	61,2
CO (g kg ⁻¹)	5,9	5,2	1,4	17,1	5,3	52,3
P (mg kg ⁻¹)	7,7	7,1	1,2	27,4	3,7	47,9
K ⁺ (mmolc kg ⁻¹)	0,1	0,1	0,01	0,3	0,0	45,8
Ca ²⁺ (mmolc kg ⁻¹)	6,9	3,3	2,1	64,7	12,4	178,5
Mg ²⁺ (mmolc kg ⁻¹)	2,6	1,6	0,7	17,9	3,1	119,7
Al ³⁺ (mmolc kg ⁻¹)	14,3	12,6	0,1	40,9	10,6	74,1
H ⁺ + Al ³⁺ (mmolc kg ⁻¹)	54,8	50,2	20,8	179,3	28,3	51,6
Na ⁺ (mmolc kg ⁻¹)	0,03	0,03	0,01	0,08	0,01	50,33
SB (mmolc kg ⁻¹)	9,7	5,7	2,9	76,9	14,7	152,5
CTC a pH 7	64,4	62,1	27,1	183,2	28,5	44,2
CTC t	23,9	21,4	5,0	77	15	62,7
V (%)	14,8	9,1	2,1	73,7	15,2	102,6
m (%)	61,1	70,7	0,1	91,8	26,5	43,4
Argila (g kg ⁻¹)	330,9	340,3	129,8	479,0	71,2	21,5
Areia (g kg ⁻¹)	529,6	532,0	123,9	776,4	95,6	18,1
Silte (g kg ⁻¹)	138,5	116,5	80,3	535,9	76,9	55,6
Fe ₂ O ₃ OAA ¹ (g kg ⁻¹)	2,50	2,00	0,62	12,46	1,91	76,46
MnO OAA (g kg ⁻¹)	0,80	0,57	0,14	4,71	0,81	101,64
Al ₂ O ₃ OAA (g kg ⁻¹)	25,98	27,94	5,47	42,56	9,91	38,15
Fe ₂ O ₃ DCB ² (g kg ⁻¹)	25,21	17,04	1,14	119,10	22,67	89,92
SiO ₂ AS ³ (g kg ⁻¹)	114,0	99,0	7,0	300,0	68,06	59,70
Al ₂ O ₃ AS (g kg ⁻¹)	127,22	112,66	29,57	261,52	59,97	47,14
Fe ₂ O ₃ AS (g kg ⁻¹)	51,62	33,73	7,63	221,43	54,55	105,67
MnO AS (g kg ⁻¹)	4,72	3,10	0,40	24,29	4,83	102,15
TiO ₂ AS (g kg ⁻¹)	0,22	0,09	0,01	1,29	0,31	142,54
Ki	1,5	1,49	0,40	2,44	0,47	31,83
Kr	1,2	1,22	0,33	1,79	0,38	32,40

¹Oxalato ácido de amônio; ²ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; ³ataque sulfúrico.

Os teores médios de óxidos de Fe extraído por ditionito foi superior ao extraído por oxalato de amônio, com predomínio das formas cristalinas em relação às amorfas. Os óxidos em regiões tropicais estão entre as variáveis do solo que mais influenciam a mobilidade de EPTs no solo (Alleoni et al., 2005). Os valores baixos de Ki e Kr caracterizaram o solo como altamente intemperizado e com predominância de argilominerais do grupo da caulinita (Campos et al., 2012).

Os elementos com teores mais elevados foram $Al > Fe > Mn$ para todos os extratores (Quadro2). Teores mais elevados desses elementos refletem a abundância e dinâmica no solo, além de elevado grau de intemperismo. Os teores dependem do potencial de oxirredução, especiação química, oxidação do solo e reflete a predominância dos óxidos na mineralogia e elevado grau de intemperismo do solo (Biondi et al., 2011). Rodrigues et al. (2001) avaliaram soluções extratoras para Fe e Mn disponíveis em Argissolos e Latossolos da região amazônica observaram também teores de Fe superiores ao de Mn independentemente do extrator, sendo observada a seguinte ordem decrescente de teores: Mehlich 3 > Mehlich 1 > DTPA-TEA.

Os teores médios dos EPTs apresentaram grande variação, indicando distribuição assimétrica dos elementos e ausência de normalidade dos dados (Quadro2), o que pode estar relacionada à heterogeneidade nas propriedades físico-químicas dos solos.

O teor de Cr ficou abaixo do limite de quantificação (LQ) para todos os extratores. O teor de Cr, abaixo do LQ, pode ser um indicativo da baixa mobilidade geoquímica em virtude da afinidade com os óxidos de Fe, que limita a mobilidade no sistema (Adriano, 2001). Avaliando a concentração de EPTs em áreas de mineração no Paraná, Andrade et al. (2009) observaram teores de Cr abaixo do limite de detecção (LD) para DTPA-TEA. Otero et al. (2012) investigaram a disponibilidade de elementos tóxicos na Espanha relataram teores de Cr abaixo do LD para Mehlich 3 (M3).

Os teores de Cu e Zn apresentaram os maiores coeficientes de variação (CV) (Quadro2). A heterogeneidade nas características físico-químicas dos solos (Quadro1) afeta a dinâmica e a disponibilidade dos metais e contribui para elevar o coeficiente de variação (Basar, 2009). As amostras coletadas em Nitossolos, Gleissolos e Latossolos com horizonte A antrópico apresentaram teores elevados de Cu e Zn. Por outro lado, 70% das amostras de Latossolos apresentaram teores inferiores a 3 mg kg^{-1} . A heterogeneidade entre as classes de solos e entre as amostras de uma mesma classe contribui para dispersão dos dados (Figura 4). Os baixos teores extraídos, na maioria dos solos (70%), podem estar relacionados à forte adsorção dos EPTs aos óxidos de Fe, Al, Mn e CO, além da intensa lixiviação (Mc Bride, 2004), comum em solos ácidos como os da Amazônia. Na Espanha, Cancela et al. (2002) avaliaram a disponibilidade de Cu, Mn, Fe e Zn em solos sob condições naturais e detectaram maiores variações de Cu e Zn em relação ao Fe e Mn para os extratores DTPA-TEA e M3.

Os teores médios de Pb foram baixos, com a seguinte ordem de extração: $M3 > M1 > DTPA-TEA$ (Quadro 2). O CV mais alto em M3 (107,6 %) está relacionado a amostras coletadas em áreas com teor elevado de CO. O Pb é fortemente associado a compostos orgânicos, e como o M3 é uma solução de natureza ácida em combinação com o complexante (EDTA), apresenta eficiência na

extração de metais associados a fração orgânica (Abreu et al., 1998) Além disso, o EDTA aumenta a solubilização do Pb devido apresentar alta constante de equilíbrio e forte afinidade química (Luo et al., 2005). Os teores de CO variaram entre as amostras de solos de uma mesma classe e de classes diferentes (Quadro1) contribuindo com a heterogeneidade dos teores de Pb extraídos pelas soluções de DTPA-TEA, M1 e M3 (Figura 4). Abreu et al. (1998) constataram teores mais elevados de Pb em horizontes superficiais de solos do estado de São Paulo extraídos por DTPA-TEA e M3 do que em amostras subsuperficiais. Os autores atribuíram essa variação à heterogeneidade da distribuição de MO no perfil do solo.

Quadro 2. Análise descritiva dos teores de elementos potencialmente tóxicos determinados pelas soluções extratoras DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3.

Vaiáveis	Al	Ba	Co	Cu	Cd	Cr	Fe	Mn	Pb	Zn
.....mg kg ⁻¹										
DTPA-TEA										
N ¹	135	135	134	130	45	Nd ³	135	135	71	135
LQ ²	0,67	0,42	0,004	0,001	0,001	0,01	0,03	0,04	0,003	0,07
Média	44,60	3,27	0,19	1,19	0,03	-	103,4	18,06	0,05	0,75
Mediana	32,32	2,81	0,05	0,26	0,01	-	93,40	5,09	0,04	0,33
Mínimo	3,32	0,10	0,01	0,01	0,01	-	16,87	0,14	0,02	0,05
Máximo	152,0	14,1	1,74	26,30	0,11	-	216,7	143,8	0,16	9,60
CV (%)	81	83	185	338	115	-	53	181	57,87	214,1
SW ⁴	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*
Mehlich 1										
N ¹	135	133	135	127	73	Nd ³	135	135	111	132
LQ ²	0,4	0,62	0,004	0,02	0,001	0,01	0,11	0,04	0,02	0,03
Média	170,7	4,50	0,70	1,11	0,07	-	63,54	8,32	0,30	0,78
Mediana	163,0	3,30	0,71	0,40	0,06	-	55,10	3,80	0,22	0,25
Mínimo	16,80	0,40	0,01	0,10	0,02	-	4,50	0,30	0,001	0,10
Máximo	548,1	12,2	2,07	21,95	0,19	-	193,5	39,25	1,39	11,80
CV (%)	61	59	51	298	86	-	57	126	66	257
SW ⁴	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*
Mehlich 3										
N ¹	135	129	135	128	49	Nd ³	135	135	116	135
LQ ²	1,2	0,01	0,001	0,002	0,001	0,02	0,05	0,05	0,001	0,001
Média	657,31	6,96	0,75	1,88	0,07	-	231,0	13,88	0,57	0,65
Mediana	696,99	2,36	0,60	0,42	0,09	-	197,1	4,53	0,45	0,33
Mínimo	132,94	0,19	0,10	0,02	0,01	-	71,88	0,48	0,04	0,03
Máximo	1147,2	52,0	3,61	39,34	0,19	-	809,0	113,4	3,76	8,45
CV (%)	31	157	91	317	82	-	67	166	108	196
SW ⁴	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*

¹Número de amostras de solos analisadas com resultados superior ao LQ; ²limite de Quantificação; ³teor abaixo do limite de quantificação (ASS); ⁴ teste de normalidade de Shapiro-Wilk; * significativa a 1% pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk entre as amostras de solos.

Outro fator a contribuir para o baixo teor de Pb nos solos é a baixa solubilidade do elemento e à forte adsorção aos óxidos de Fe e de Mn (Abreu et al., 2004). Em Latossolos e Argissolos sob

condições naturais no estado de São Paulo, Abreu et al. (1995) relataram amplitudes elevadas nos teores extraídos por DTPA-TEA ($0,6-5,9 \text{ mg kg}^{-1}$), M1 ($1,1-2,6 \text{ mg kg}^{-1}$) e M3 ($4,6-11,0 \text{ mg kg}^{-1}$), atribuindo tal variação aos teores de óxidos.

O Cd apresentou as menores variações entre os elementos analisados para todas as soluções extratoras (Quadro 1). No entanto, os teores não apresentaram distribuição normal entre as amostras de solos (Figura 4). A heterogeneidade pode ser atribuída à diversidade de material de origem. Na região de estudo, 87% dos solos são Latossolos e Argissolos predominantemente da Formação Alter do Chão e 2% Nitossolos da Formação Penatecaua (Rodrigues et al., 2007). Os solos formados a partir de rochas básicas apresentam teores mais elevados de EPTs em relação a solos desenvolvidos sobre influência de rochas ácidas (Kabata-Pendias & Pendias, 2010).

Os baixos teores de Cd podem estar relacionados à alta mobilidade devido à baixa afinidade com os óxidos de Fe e Al (Kabata-Pendias & Pendias, 2010), predominantes nos solos do estado Pará (Falesi, 1986). Birani (2011) obteve teores disponíveis de EPTs em solos no Estado do Pará e relatou menores médias e amplitudes para Cd em relação aos elementos investigados e atribuiu as baixas concentrações ao elevado grau de intemperismo do solo e às condições ácidas que favorecem a solubilidade.

O Ba foi o quarto elemento com maior teor, com média de 3,3, 4,5 e $7,0 \text{ mg kg}^{-1}$ para DTPA-TEA, M1 e M3, respectivamente. Os valores mais altos de Ba, quando comparados a outros EPTs, podem estar relacionados ao maior teor no material de origem e a substituição do K^+ na estrutura do feldspato, que pode ser mobilizado sob diferentes condições ambientais (Biondi et al., 2011). Além disso, os teores variam de acordo com características do solo como pH, teor de argila e MO (Merlino et al., 2010). Em solos de outra região do estado do Pará Birani (2011) relatou teores inferiores de EPTs aos encontrados nos solos deste estudo, com média de 0,1, 2,9 e $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$, para M1, M3 e DTPA-TEA, respectivamente.

O estado do Pará não apresenta estudo para a determinação de classes de interpretação e definição de extratores para avaliar teores disponíveis de micronutrientes em solos. Para isso, foram realizada extração de Cu, Zn, Mn e Fe para os extratores DTPA-TEA, M1 e M3 e a comparação dos valores com classes de interpretação de micronutrientes em uso em diferentes estados brasileiros. Devido à ausência de normalidade dos dados optou-se pelos teores medianos para fazer a comparação.

Os teores de Cu, Zn e Mn encontrados em solos da rodovia Transamazônica ficaram abaixo da quantidade mínima e suficiente, em termos de exigência nutricional, para as principais culturas (Rajj et al., 2011; Alvarez et al., 1999; Embrapa, 2007) que caracteriza deficiência e a necessidade de adubação com micronutrientes (Quadro 3). O baixo nível de Cu, Zn e Mn refletem o avançado

grau de intemperismo, intensa lixiviação e a pobreza do material de origem. Na região predomina os Argissolos e Latossolos com a mineralogia caulinítica e oxídica (Falesi, 1986).

Quadro 3. Valores medianos de micronutrientes em solos darodovia Transamazônica no estado do Pará e comparação com dados copilados de algumas das classes de interpretação, em uso no Brasil.

		Cu	Fe	Mn	Zn
		mg kg ⁻¹			
Embrapa ¹	Mehlich 1	0,70-1,80	18-45	5-12	0,90-2,2
Raij ²	DTPA-TEA	0,30-0,80	5,00-12,0	1,50-5,0	0,60-1,20
Alvarez ³	Mehlich 1	0,8-1,2	19-30	6-8	1,0-1,5
BR-230 ⁴	DTPA-TEA	0,26	93,40	5,09	0,33
	Mehlich 1	0,40	55,10	3,80	0,25
	Mehlich 3	0,42	197,1	4,53	0,33

¹Limites de interpretação dos teores de micronutrientes em solos do estado do Pará (Embrapa, 2007); ²Limites de interpretação dos teores de micronutrientes em solos do estado de São Paulo (Raij, 2011); ³Limites de interpretação dos teores de micronutrientes em solos do estado de Minas Gerais (Alvarez et al., 1999). ⁴Teores mediano de micronutrientes darodovia Transamazônica (BR-230), estado do Pará.

De maneira geral, os teores de Fe foram superiores a média relatada em outras regiões brasileira (Quadro 3), para todos os extratores. Teores elevados podem está relacionado a gêneses e ao grau de intemperismo, com predominância de minerais secundários como hematita e goethita na mineralogia da fração argila (Burak et al., 2010). Teores de elevados de Fe podem ocasionar toxidez e influenciar a disponibilidade de outros nutrientes, como P (Farella et al., 2007). Os contrastes entre os extratores e entre as classes de interpretação ressaltam a importância da determinação dos teores disponíveis a nível regional que poderão e a partir destes estabelecer os valores de referência. A extrapolação de valores para regiões diferentes do local de obtenção dos dados ou para comparação entre solução extratoras pode ocasionar intervenção inadequada e alterações na qualidade do solo e da saúde humana.

Foi estabelecidas correlações de Pearson ($p < 0,05$ e $p < 0,01$) para os metais entre as soluções extratoras (Figura 2 e 3), com exceção do Pb e Cd que não apresentaram correlações significativas. A ausência de correlação pode está relacionado aos baixos teores extraídos.

Os métodos DTPA-TEA, M1 e M3 correlacionaram ($p < 0,05$ e $p < 0,01$) positivamente entre si quanto à extração de Mn, Zn e Cu (Figura 2). Essas correlações indicam que independentemente da natureza dos extratores, ácido ou quelante, a capacidade de extração desses elementos pelas soluções extratoras foram semelhantes (Brennan et al. (2008). Sarto et al. (2011) relataram correlação significativa para teores de Mn, Cu e Zn por M1 e por M3 em solos do Paraná. Brennan et al. (2008) também observaram correlações positivas entre os teores de Cu e Zn extraídos por M3 e por DTPA-TEA em solos irlandeses.

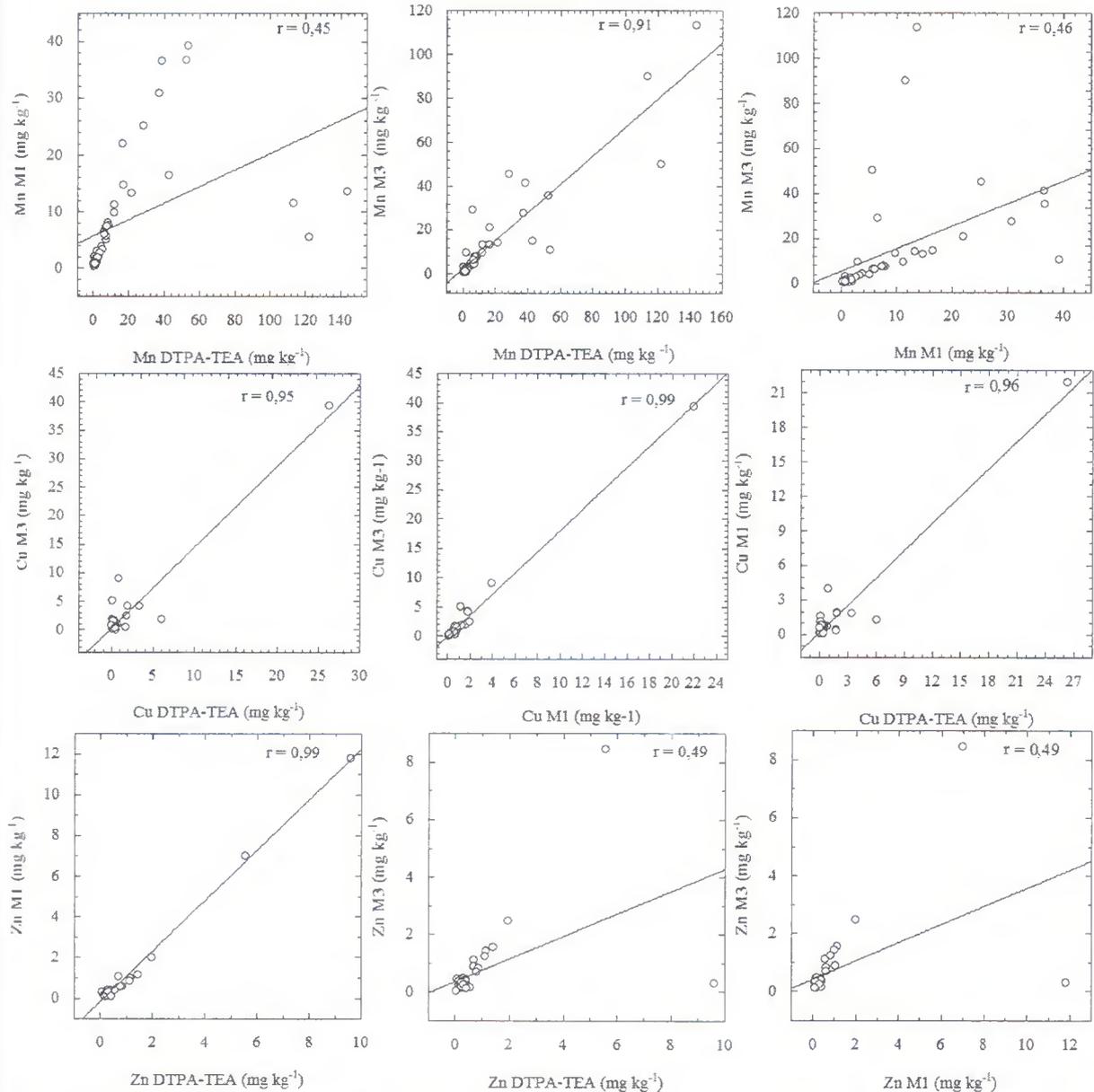


Figura 2. Correlações entre teores de Mn, Cu e Zn, extraídos por Mehlich-1, Mehlich-3 e DTPA-TEA. *significativo a 1% pelos de teste de Kruskal-Wallis.

Os teores de Al e de Co, extraídos por M1 e por M3 correlacionaram positivamente (Figura 3). Correlações significativas entre M1 e M3 são atribuídas às relações estreitas entre as soluções extratoras devido ao princípio químico de extração ser semelhante, com elevada acidez, o que proporciona elevada solubilização dos elementos (SARTO et al., 2011). Os teores de Ba e de Fe extraídos com DTPA-TEA correlacionaram positivamente com os teores extraídos por M3 (Figura 3). A similaridade entre os extratores pode estar relacionada à presença dos agentes complexantes DTPA e EDTA nas soluções extratoras (Brennan et al., 2008), por apresentarem os grupos carboxílicos e aminos que tem afinidade com Ba e Fe. Abreu et al. (2004) encontraram coeficiente

de correlação igual a 0,82 para teores de Fe extraídos por M3 e por DTPA-TEA em solos do estado de São Paulo.

As correlações positivas e significativas entre os teores da maioria dos EPTs extraídos por DTPA-TEA, M1 e M3 mostram a similaridade e adequabilidade dos extratores para estimar as concentrações desses metais que estão disponíveis para serem absorvidos por organismos ou lixiviado para águas subterrâneas (Kabata-Pendias & Pendias, 2010). A dispersão dos pontos pode ser atribuída à heterogeneidade nos atributos físicos e químicos e ao elevado grau de intemperização dos solos, na maioria Latossolos e Argissolos. Além disso, as soluções agem de forma distinta de acordo com as frações do solo onde os elementos estão adsorvidos ou complexados (Bortolon & Gianello, 2009) justificando extrações diferentes entre os extratores para uma mesma amostra de solo.

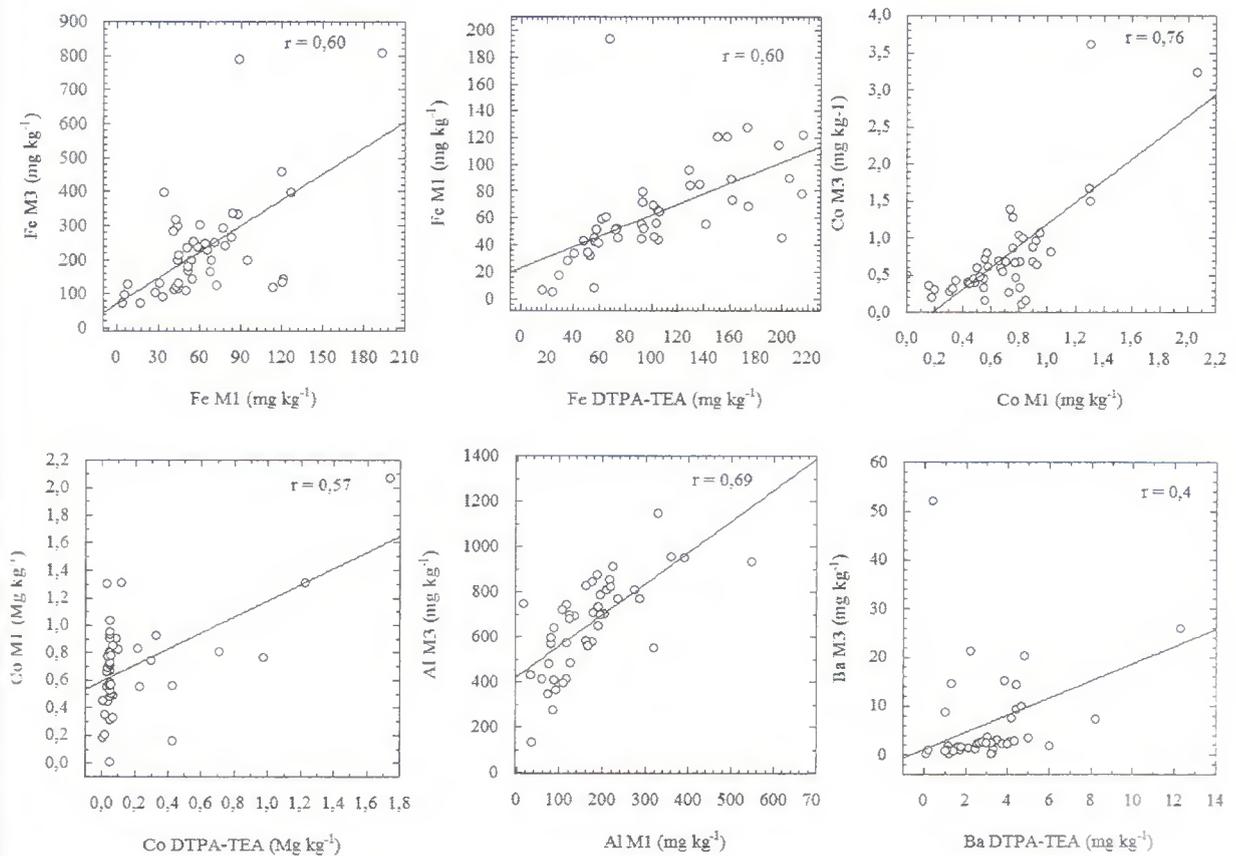


Figura 3. Correlações entre teores de Fe, Co, Al e Ba, extraídos por Mehlich-1, Mehlich-3 e DTPA-TEA. *significativo a 1% pelos de teste de Kruskal-Wallis.

A correlação de Pearson entre teores de EPTs e os atributos físico-químico do solo pode ser considerada baixa (Quadro 4). O teor de CO correlacionou-se positivamente com teores de Zn, Mn, Ba e Cd extraídos por M1 e com teores de Al, Cd, Ba e Zn extraídos por DTPA-TEA. Correlações

entre os teores dos EPTs e CO são indicativos da complexação/adsorção desses elementos pelos ânions orgânicos derivados de ácidos húmicos e fúlvicos, por ligação ao oxigênio nos grupamentos carboxílicos e fenólicos (Nascimento et al., 2002), o que evidencia a importância da MO na retenção de EPTs em solos ácidos como os da Amazônia. Roca et al. (2012) encontraram correlação positiva entre teores de Cu, Cd, Mn e Zn extraídos por DTPA-TEA e de carbono orgânico em solos da região semiárida na Argentina.

Os teores de Cu e de Zn correlacionaram positivamente com a CTC e com teores de argila e de CO, independentemente do extrator. Em solos altamente intemperizados como o da Amazônia, a CTC é dependente tanto do teor e tipo de argila quanto do teor de carbono orgânico (Nogueiro et al., 2010), sendo uma das variáveis que mais influencia no complexo sortivo e na disponibilidade dos EPTs nos solos (Otero et al., 2012).

O pH correlacionou-se negativamente com teores de Al e de Co extraídos por M1 e M3, com os teores de Fe extraídos com DTPA-TEA e M1. Por outro lado, correlacionou-se positivamente com teores de Cu, Mn e Zn para os três extratores e Ba quando extraído por DTPA-TEA e M3 (Quadro 4). Correlações entre os metais e o pH indica que a mobilidade desses elementos está relacionado com as condições ácido-base do solo. Em solos na Irlanda, Brennan et al. (2008) relataram correlação positiva entre Zn e Cu extraídos por M3 e DTPA-TEA com o pH, tanto em solos de origem calcário quanto de arenito. Na Espanha Otero et al. (2012) relataram correlação positiva entre Cu, Pb e Zn extraídos por M3 com o pH.

A ausência de correlação entre alguns EPTs e o pH pode estar relacionada ao baixo teor dos elementos em solos ácidos (Zhang et al., 2002) de regiões tropicais, devido a intensa lixiviação e a atividade microbiana que favorece a solubilização e perdas por lixiviação (Fonseca et al., 2010). Fonseca et al. (2010) relataram que o pH foi o principal fator que influenciou a disponibilidade de Cu, Fe, Mn e Zn em solos paranaenses.

Os teores de argila apresentaram correlações positivas com os teores de Ba, Cu e Al extraídos por M1, Cu por DTPA-TEA e Cu e Zn por M3 (Quadro 4). O teor de argila é um dos fatores mais importantes ao se avaliar o conteúdo de EPTs no solo, devido à associação entre os EPTs e os argilominerais (Alleoni et al., 2005). A correlação entre a argila e apenas alguns metais extraídos pelas soluções pode estar relacionada à predominância da fração areia na camada superficial, com menor capacidade sortiva. Roca et al. (2012) observaram correlação positiva entre teores de Cu, Zn, Mn e Fe extraídos com DTPA-TEA e os teores de argila de solos argentinos. Por outro lado, Birani (2011) comparou a disponibilidade de EPTs por DTPA, M1 e M3 em solos paranaenses não cultivados e não obteve correlações positivas entre os teores dos EPTs e o teor de argila na camada de 0,0-0,2 m.

Quadro 4. Coeficiente de correlação entre elementos potencialmente tóxicos e atributos físico-químicos dos solos do entorno da rodovia Transamazônica.

	Fe	Mn	Al	Co	Cd	Cu	Ba	Zn	Pb
	DTPA-TEA								
MO	-0,07	-0,32*	0,27	0,02	0,38*	0,23	0,32*	0,59*	0,02
CTC	0,02	-0,18	0,27	0,00	0,17	0,57*	0,14	0,67*	0,19
pH	-0,42*	0,38*	-0,49*	0,46*	-0,11	0,59*	0,07	0,78*	0,32*
Argila	-0,03	-0,29	0,16	0,07	-0,09	0,40*	0,12	0,27	0,29
Fe ₂ O OAA ¹	-0,09	-0,21	0,06	0,11	0,59*	-0,03	0,13	-0,01	-0,1
MnO OAA	-0,1	-0,05	0,01	0,1	0,41*	0,14	0,1	0,01	0,1
Al ₂ O ₃ OAA	0,02	0,01	0,02	-0,12	-0,25	-0,04	-0,21	-0,33*	0,22
Fe ₂ O ₃ DCB ²	-0,05	0,16	0,00	0,00	0,60*	-0,06	-0,15	-0,1	-0,09
SIO ₂ AS ³	0,03	0,06	0,23	0,22	-0,02	-0,08	0,01	-0,16	-0,24
Al ₂ O ₃ AS	0,00	0,01	0,2	0,25	-0,04	-0,14	0,12	-0,12	-0,29
Fe ₂ O ₃ AS	0,46*	0,01	0,31	-0,07	-0,02	-0,09	-0,02	-0,07	-0,24
MnO AS	0,03	-0,21	-0,07	0,05	0,09	0,06	0,21	0,17	-0,15
TiO ₂ AS	-0,01	-0,11	-0,08	-0,01	0,38*	0,19	0,08	0,23	-0,09
	Mehlich 1								
MO	0,07	0,04	0,35*	-0,29	0,40*	0,16	-0,31*	0,56*	-0,27
CTC	0,02	0,2	0,12	-0,25	0,24	0,50*	-0,26	0,64*	-0,08
pH	-0,44*	0,55*	-0,2	0,16	0,16	0,55*	0,35*	0,79*	-0,08
Argila	0,00	0,21	0,33*	-0,19	0,24	0,40*	0,51*	0,25	-0,17
Fe ₂ O OAA	0,01	-0,11	0,42*	-0,12	0,69*	0,01	-0,22	-0,01	-0,11
MnO OAA	0,09	0,15	0,51*	-0,06	0,72*	0,09	-0,16	0,01	-0,25
Al ₂ O ₃ OAA	-0,19	-0,12	-0,3	0,08	-0,28	-0,02	0,1	-0,33*	0,00
Fe ₂ O ₃ DCB	0,09	-0,04	0,25	0,24	0,49*	-0,08	0,02	-0,08	-0,02
SIO ₂ AS	0,02	-0,09	-0,01	0,26	-0,04	-0,1	0,07	-0,15	0,05
Al ₂ O ₃ AS	-0,11	0,05	-0,16	0,32*	-0,12	-0,1	0,11	-0,13	0,02
Fe ₂ O ₃ AS	0,2	-0,11	-0,23	-0,03	0,05	-0,11	-0,07	-0,07	0,18
MnO AS	0,26	-0,06	0,02	-0,05	0,28	0,08	-0,06	0,16	-0,14
TiO ₂ AS	0,19	0,00	-0,05	-0,1	*0,24	0,15	-0,04	0,22	0,00
	Mehlich 3								
MO	-0,12	-0,12	0,29	-0,13	0,0	0,29	-0,23	0,15	-0,04
CTC	0,06	-0,04	0,24	-0,1	-0,16	0,60*	-0,14	0,51*	0,29
pH	-0,22	0,42*	-0,53*	0,38*	-0,01	0,63*	0,37*	0,61*	-0,05
Argila	-0,12	0,16	0,11	0,08	-0,22	0,39*	-0,28	0,32*	0,06
Fe ₂ O OAA	-0,13	-0,1	-0,02	-0,09	-0,21	-0,02	-0,01	-0,07	0,07
MnO OAA	-0,3	0,16	0,00	-0,11	0,15	0,16	0,07	0,13	-0,1
Al ₂ O ₃ OAA	0,13	-0,01	0,01	0,08	-0,12	-0,08	0,11	-0,08	0,21
Fe ₂ O ₃ DCB	-0,2	-0,06	0,14	-0,06	-0,16	-0,08	-0,04	-0,01	0,00
SIO ₂ AS	0,01	-0,08	0,27	0,18	0,21	-0,09	-0,05	0,03	0,01
Al ₂ O ₃ AS	0,06	0,09	0,29	0,36*	0,17	-0,14	-0,1	-0,09	-0,11
Fe ₂ O ₃ AS	0,59*	-0,13	0,21	-0,13	0,23	-0,11	-0,05	0,03	0,16
MnO AS	0,26	-0,14	-0,01	0,03	0,13	0,08	-0,16	0,05	0,06
TiO ₂ AS	0,31	-0,11	0,01	-0,1	-0,02	0,18	-0,11	0,24	-0,01

¹oxalato de amônio; ²ditionito citrato bicarbonato de sódio; ³ataque sulfúrico, *significativo a 1%.

Os teores dos óxidos foram as variáveis que menos se correlacionaram com os teores dos EPTs em todas as soluções extratoras (Quadro4). Os teores de Cd extraídos por DTPA-TEA e por

M1 correlacionaram com óxidos amorfos de Fe e de Mn, Fe livres e Ti extraído por ataque sulfúrico. Teores de Zn-DTPA-TEA e Zn-M1 correlacionaram negativamente com o teor de Al amorfo. Os teores de Co extraídos por M1 e M3 correlacionaram negativamente com o teor de Al extraído por ataque sulfúrico. Entre os óxidos, a forma amorfa foi a que melhor se correlacionou com os teores dos EPTs, provavelmente devido às menores dimensões e elevada superfície específica, o que lhes confere grande influência nas propriedades físico-químicas do solo (He et al., 2010).

Não houve diferença ($p > 0,05$) entre as três soluções extratoras na capacidade de extração dos elementos Cd, Cu, Zn, e Mn (Figura 4), cujos teores foram muito baixos. Este resultado pode estar relacionado aos comportamentos geoquímicos desses elementos que apresentam massa atômica, raio iônico e estado de oxidação semelhante (Paye et al., 2012; Burak et al., 2010). Durante os processos pedogenéticos, esses elementos não são incorporados nas estruturas dos minerais, devido ao desequilíbrio de cargas, sendo facilmente lixiviados (Marques et al., 2004), o que lhes confere teores muito baixos, na maioria dos solos.

As soluções de DTPA-TEA e M3 extraíram teores de Ba semelhantes e superiores ao extraído por M1 (Figura 4). Esses teores mais elevados são devidos à presença dos complexantes DTPA e EDTA, que são eficiente na remoção de metais ligados à fração trocável, carbono orgânico e associadas a carbonato, embora apresente baixa eficiência na remoção de metais ligados aos óxidos (Elliott & Shastri 1999; Abreu et al., 2004, Abreu et al., 2002). O teor de Ba extraído por DTPA-TEA nos solos paraenses correlacionou positivamente com o teor de CO. Por outro lado, a correlação entre teor de Ba extraído por M1 foi negativa com CO, sugerindo que boa parte do Ba pode estar ligado a MO.

Houve diferença ($p > 0,05$) entre as soluções para a extração de Fe, Pb e Al, cujos teores foram maiores em M3 seguidos por M1 e DTPA-TEA. As diferenças refletem a especificidade dos extratores em relação a estes elementos. Os teores mais elevados extraídos pela solução de M3 podem estar associados à combinação de agentes quelantes com ácidos que favoreceu a extração de metais ligados a diferentes frações do solo. A solução complexante extrai mais das frações lábeis e a solução ácida os elementos contidos na fase sólida do solo (Andrade et al., 2009).

A superioridade da solução M3 na capacidade de extrair Fe foi comprovada por Rodrigues et al. (2001) comparando as soluções DTPA-TEA, M1 e M3, em solos representativos da região Amazônica; por Sarto et al. (2011) em solos do estado do Paraná e por Abreu et al. (2004) em solos de São Paulo. Avaliando a disponibilidade de Cd, Pb, Cu e Zn em solos do sudoeste chinês com o acúmulo desses elementos em plantas de arroz, Zhang et al. (2010) relataram maior extração de Pb para M3 em relação a M1 e DTPA-TEA.

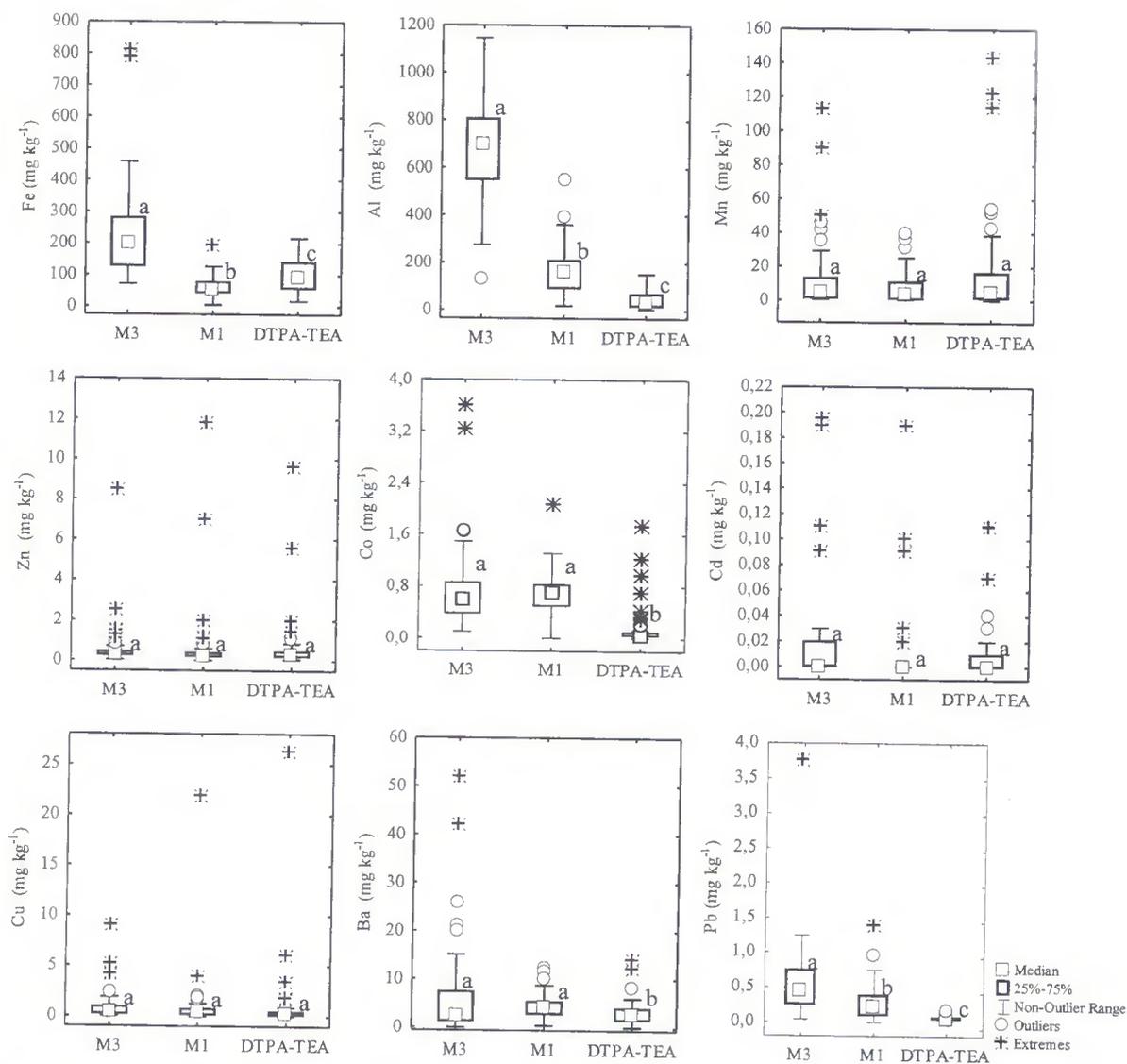


Figura 4. Boxplots dos teores Fe, Mn, Al, Co, Cd, Cu, Ba, Zn, Pb, para as soluções extratoras Mehlich 1 (M1), Mehlich 3 (M3) e DTPA-TEA. Elementos potencialmente tóxicos com mesma letra não diferem entre os métodos pelo teste kruskalmc ($p < 0,05$).

Como não houve diferença entre as soluções extratoras, a solução de Mehlich 1 é a mais recomendada para extrações de Cu, Zn, Mn, Co, Cd e Ba, em solos do estado do Pará, tendo em vista já ser adotada pelos laboratórios como análise de rotina para P disponível e K trocável, tornando o procedimento mais simples.

Os extratores ácidos M1 e M3 extraíram concentrações semelhantes de Co e superiores ao DTPA-TEA (Figura 4). No entanto, ambos removeram baixas concentrações do elemento, 2 e 7 mg kg⁻¹, respectivamente. A baixa extração de Co pode estar relacionada à elevada concentração dos teores de óxidos de Fe e de Al nos solos estudados (Quadro 1). Durante o intemperismo, em ambientes ácidos e oxidados, o Co é relativamente móvel, mas passa a apresentar baixa mobilidade

se adsorvido à superfície dos óxidos de Fe, Mn e Al e minerais silicatados (Kabata- Pendias & Pendias, 2010). Por outro lado, baixos teores de Co extraídos por DTPA-TEA podem estar relacionados à baixa eficiência do extrator na extração das formas oxídicas (Andrade et al., 2009).

A ACP foi realizada sobre a matriz de dados composta de 21 variáveis (Quadro 1 e 2), os atributos físicos, químicos e os EPTs em 135 amostras de solos para as soluções extratoras DTPA-TEA, M1 e M3. Em cada método foram estabelecidas duas componentes principais PC1 e PC2, as quais explicaram 75% da variação total em DTPA-TEA, 71% em M1 e 73% em M3 (Figura 5).

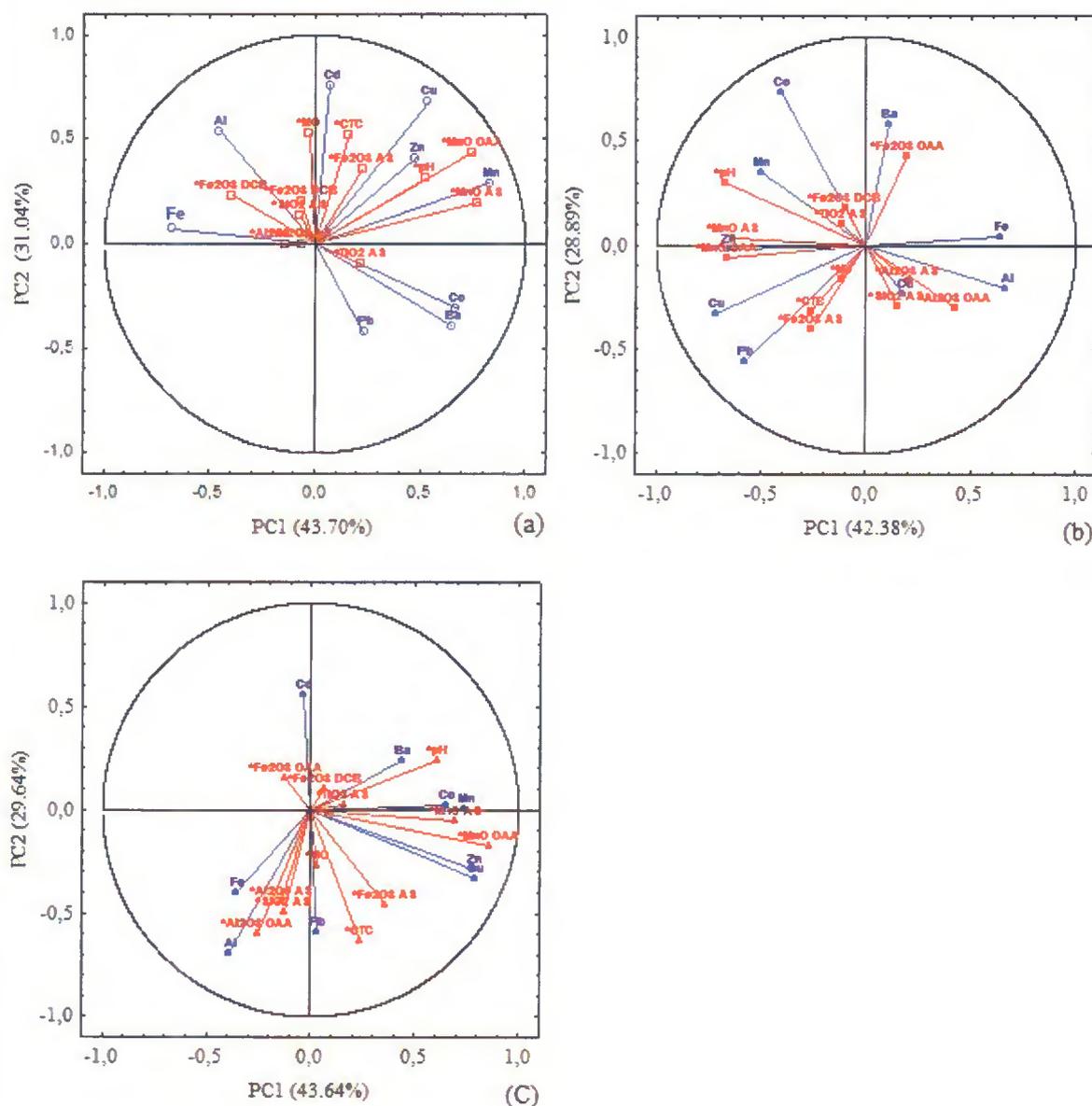


Figura 5. Análise de componentes principais de variáveis relacionadas com atributos físicos e químicos e os elementos potencialmente tóxicos, pelos métodos DTPA-TEA (a), Mehlich 1 (b), Mehlich 3 (c).

Os resultados das componentes principais para DTPA-TEA mostra a influência especialmente do pH e dos teores dos óxidos de Mn em relação ao Co, Ba, Mn e Zn na PC1. Na PC2 fica clara a influência dos teores dos óxidos de Fe, MO e CTC para Cu, Al e Cd. Os teores de Al, Fe, Cd, Cu e Pb extraídos por M1 foram influenciados positivamente pelos teores de óxidos de Al e Si, na PC1, enquanto os óxidos de Mn, Fe e a CTC influenciaram negativamente os teores de Cu, Pb, Mn. Na PC2 o Ba, Co e Mn foram influenciados positivamente pelos teores dos óxidos de Fe e do pH. Na solução extratora M3, na PC1, houve influência positivamente dos teores dos óxidos de Fe e Mn e pH em relação aos elementos Zn, Cu, Ba, Co e Mn e negativamente dos óxidos de Al, Fe e Si e a CTC, em relação aos elementos Fe e Al. Na PC2 houve influência positiva dos óxidos de Fe com o Cd e negativamente com Pb.

A sobreposição ou aproximação dos autovetores entre os EPTs pode ser um indicativo do sinergismo entre elementos em relação ao comportamento geoquímico ou a competição pelos sítios de adsorção, ajudando a compreender o padrão de disponibilidade dos EPTs no solo (Gupta & Sinha, 2007; Yu et al., 2012). O agrupamento de metais poluentes com o CO e com os óxidos pode ser indicativo da maior concentração dos EPTs nessas frações do solo. Por outro lado, o agrupamento dos elementos potencialmente tóxicos com a CTC e pH mostra a influência do complexo sortivo na disponibilidade dos EPTs no solo.

3.4 CONCLUSÕES

1. Correlações significativas foram estabelecidas entre os teores dos elementos potencialmente tóxicos e carbono orgânico, pH, capacidade de troca de cátions, e teores de óxidos de Fe e de Mn. Cu e Zn apresentaram correlações com a maioria dos atributos analisados;
2. As soluções extratoras DTPA-TEA, Mehlich 1 e Mehlich 3 apresentaram correlação positiva com os teores de Cu, Mn, Fe e Zn, indicando similaridade nas formas extraídas;
3. Mehlich 3 extraiu teores mais altos de Fe, Al e Pb em relação a Mehlich 1 e DTPA-TEA e teores semelhantes para Cd, Mn, Zn e Cu.

LITERATURA CITADA

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. R. Bras. Ci. Solo, 19: 463-468, 1995.

ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; ANDRADE, J. C. Distribuição de chumbo no perfil de solo avaliada pelas soluções de DTPA e Mehlich-3. Bragantia, 57, 1998.

- ABREU, C.A.; RAIJ, B. V.; ABREU, M. F.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Avaliação da disponibilidade de manganês e ferro em solos pelo uso do método modificado da resina de troca iônica. *R. Bras. Ci. Solo*, 28: 579-584, 2004.
- ABREU, C.A.; RAIJ, B. V.; GABE, U.; ABREU, M.F.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Efficiency of multinutrient extractants for the determining of available zinc in soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 3313-3324, 2002.
- ADRIANO, D. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals, Second ed. Springer, New York, 2001. 867 p.
- ALLEONI, L. R. F.; BORBA, R. P.; CAMARGO, O, A. Metais pesados: da cosmogênese aos solos brasileiros, In: TORRADO-VIDAL, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A, P. eds, Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa, SBCS, v. IV, 2005. p.1- 42.
- ALLOWAY, B. J. The origins of heavy metals in soil. In: ALLOWAY, B. J (ed.). Heavy metals in soils. 2 ed. London: Blackie Academic. 1995. 38 – 57.
- ALVAREZ VENEGAS, V. H. R. F.; NOVAIS. N. F.; BARROS, R. B.; CATARUTTI, A.; LOPES, S. Interpretation of soil analysis results, In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ VENEGAS V. H. Recommendations for use of amendments and fertilizers in Minas Gerais, 5 ed., Viçosa, Brazil, 1999. P. 25–32.
- Anderson, J. M.; Ingram, J. S. I. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods. Wallingford: CAB International. (1992).
- ANDRADE, M. G.; MELO, V. F.; SOUZA, L. C. P.; GABARDO, J.; REISSMANN, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. II - formas e disponibilidade para plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1889-1897, 2009.
- BASAR, H. Estimation Methods for Metals in phytoavailable soils. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal*, 40: 1087-1105, 2009.
- BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FABRICIO NETA, A. B.; RIBEIRO, M. R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em solos de referência de Pernambuco. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, vol.35: 1057-1066, 2011.
- BIRANI, S. M. Teores de metais disponíveis e atributos químicos em solos do Estado do Pará. 2010, 101 p, Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2010.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Disponibilidade de cobre e zinco em solos do sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:647-658, 2009.
- BRENNAN, D.; COULTER, B.; MULLEN, G.; COURTNEY, R. Evaluation of Mehlich 3 for Extraction of Copper and Zinc from Irish Grassland Soils and for Prediction of Herbage Content. *Comm. Soil Sci. Plant Anal*, 39: 1943–1962, 2008.

BURAK, D. L.; FONTES, M. P.F.; SANTOS, N. T.; MONTEIRO, L. V. S.; MARTINS, E. S.; BECQUER, T. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. *Geoderma*, 160:131–142, 2010.

CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. *Ambiência*, 6:547 - 565, 2010.

CANCELA, R. C.; ABREU, C. A.; PAZ-GONZÁLEZ, A. DTPA and Mehlich micronutrient extractability in natural soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 33:2879- 2893, 2002.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e água subterrâneas no Estado de São Paulo, São Paulo: CETESB, p. 247, 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 420 de 28 de Dezembro de 2009. Dispõe sobre 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. Brasília, 2009, publicada no Diário Oficial da União de 30 de Dezembro de 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>. Acesso em 15 de outubro de 2012.

DISLA, J. M. S.; SPEIR, T. W.; GÓMEZ, I.; CLUCAS, L. M.; MCLAREN, R. G.; PEDREÑO, J. N. Evaluation of Different Extraction Methods for the Assessment of Heavy Metal Bioavailability in Various Soils. *Water, Air, Soil Pollut.* 213: 471–483, 2010.

ELLIOTT, H.A.; SHASTRI, N.L. Extractive decontamination of metal-polluted soils using oxalate. *Water Air Soil Pollut.*, 110:335-346, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Manual de métodos de análise de solo, Rio de Janeiro, 1997.

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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Pará. ed. Belém, PA, Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 262p.

FADIGAS, F. S.; SOBRINHO, N. M. B. A.; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C.; FREIXO, A. A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros, *Bragantia*, 61:151-159, 2002.

FALESI, I. C. Solos da Rodovia Transamazônica. Belém: IPEAM. Boletim Técnico. n 55. 1986. 196p.

FARELLA, N.; DAVIDSON, R.; LUCOTTE, M.; DAIGLE, S. Nutrient and mercury variations in soils from family farms of the Tapajos region (Brazilian Amazon): Recommendations for better farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 120: 449–462, 2007.

FEARNSIDE, P.M. & B. MILLIKAN. Hidrelétricas na Amazônia: Fonte de energia limpa? pp. 47-54; 93- 99. In: P.F. Moreira (ed.) Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios. 2 a ed. Rios Internacionais, Brasília, DF. 2012. 100 pp.

FONSECA, A.F.; CAIRES, E.F.; BARTH, G. Extraction methods and availability of micronutrients for wheat under a no-till system with a surface application of lime. *Sci. Agric.*, 67:60-70, 2010.

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*, Madison, p. 255-293, 2002. (Book Series, 5).

GUPTA, A. K.; SINHA, S. Assessment of single extraction methods for the prediction of bioavailability of metals to *Brassica juncea* L. Czern. (var. Vaibhav) grown on tannery waste contaminated soil. *J. Hazard. Mater.* 149: 144–150, 2007.

HAIR JR, J. P.; ANDERSON, R. E. TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. *Análise de Multivariada de dados*. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HE, J. Z.; MENG Y.T.; ZHENG, Y. M.; ZHANG, L.M. Cr(III) oxidation coupled with Mn (II) bacterial oxidation in the environment. *J. Hazard. Mater.* 10:767–773, 2010.

INMETRO, Orientação sobre validação de métodos analíticos, 2010. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/Sidoq/,,,/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-8_03.pdf>. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>. Acesso em: 15 dez. 2012. Acesso em mar. 2012.

KABATA-PENDIAS, A. *Trace elements in soil and plants*. 4 ed, p.cm. 2010. 423P.

LINDSAY, W.L.; NORVELL, W.A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 42:421-428, 1978.

LOEPPERT, R. L.; INSKEEP, W. P. Iron In: BIGHAM, J. M. *Methods of soil analysis*, *Soil Sci. Soc. Am.*, 639-664, 1996.

LUO, A.; ZHANG, S.; SHAN, X. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils. *Geoderma*, 125:225–234, 2005.

LUO, X. S.; YU, S.; LI, X. D. The mobility, bioavailability, and human bioaccessibility of trace metals in urban soils of Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 27: 995–1004, 2012.

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

MCBRIDE, M.B.; RICHARDS, B.K.; STEENHUIS, T. Bioavailability and crop uptake of trace elements in soil columns amended with sewage sludge products. *Plant Soil*, 262:71-84, 2004.

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. *Comm. Soil Sci. Plant Anal. New York*, 15:1409-1416, 1984.

- MEHRA, J. A.; JACKSON, M. L. (1960). Iron oxides removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals.*, 5:317-327.
- MENEZES, A. A.; DIAS, L. E.; NEVES, J. C. L.; SILVA, J. V. O. Disponibilidade de zinco para milho pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DTPA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 34:417-424, 2010.
- MERLINO, L. C. S.; MELO, W. J. F.; MACEDO, G.; GUEDES, A. C. T. P. M. RIBEIRO, H.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Bário, cádmio, cromo e chumbo em plantas de milho e em Latossolos após onze aplicações anuais de lodo de esgoto. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:2031-2039, 2010.
- MOREIRA, A.; FAGERIA N. K. Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*40: 2912-2925, 2009.
- NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F.; NEVES, J. C. L.; MELÍCIO, A. C. F. D. Fracionamento, dessorção e extração química de zinco em Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:599-606, 2002.
- NOGUEIROL, R. C.; ALLEONI, L. R. F.; NACHTIGALL, G. R.; MELO, G. W. Sequential extraction and availability of copper in Cu fungicide-amended vineyard soils from Southern Brazil. *J. Hazard. Mater.*, 181:1931-1937, 2010.
- OTERO, X. L.; ÁLVAREZ, E.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J.; MACÍAS, F. Micronutrients and toxic trace metals in the bulk and rhizospheric soil of the spontaneous vegetation at an abandoned copper mine in Galicia (NW Spain). *J. Geochem. Explor.* 112:84-92, 2012.
- PAYE, H. S.; MELLO, J. W. V.; MELO, S. B. Métodos de análise multivariada no estabelecimento de valores de referência de qualidade para elementos-traço em solos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 36: 1031-1042, 2012.
- RAIJ, B.V. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- ROCA, N. PAZOS.; M, S. BECH. J. Background levels of potentially toxic elements in soils: A case study in Catamarca (a semiarid region in Argentina). *Catena*, 92:5-66, 2012.
- RODRIGUES, M. R. L.; MALAVOLTA, E.; MOREIRA, A. Comparação de soluções extratoras de ferro e manganês em solos da Amazônia. *Pesq. Agropec. Bras.* 36: 143-149, 2001.
- RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. C.; SILVA, B. N. R.; SILVA, J. M. L.; VALENTE, M. A.; DARIVA, T. A.; SOUTO DE JESUS, A. A.; VENTURIERI, A. Caracterização, mapeamento e classificação dos solos da área de influência da BR-163 (Cuabá-Santarém) e da BR-230 (Transamazônica), no Estado do Pará. In: Embrapa Amazônia Oriental, ed. Zoneamento-Ecológico Econômico da área de influência da rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém). Belém, PA. 2007. p. 403-571.

SARTO, M. V. M.; STEINER, F.; LANA, M. C. Assessment of micronutrient extractants from soils of Paraná, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:2093-2103, 2011.

SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 1999. 370p.

TOURNEAU, F. M.; BURSZTYN, M. Assentamentos rurais na Amazônia: contradições entre a política agrária e a política ambiental. *Amb.Soci.* 1:111-130, 2010.

YU, J.; HUANG, Z.; CHEN, T.; QIN, D.; ZENG, X.; HUANG, Y. Evaluation of ecological risk and source of heavy metals in vegetable-growing soils in Fujian province, China. *Environ Earth Sci.* 65:29-37, 2012.

ZHANG, M. K.; LIU, Z.; WANG, H. Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice. *Comm. SoilSci. Plant Anal.* 41:820-831, 2010.

4 CONCLUSÃO GERAL

Os solos do estado do Pará apresentaram baixos teores de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e altos teores de Al^{3+} trocável em Latossolos, Argissolos, Plintossolos e Neossolos, médios em Nitossolos, Cambissolos e Gleissolos. O P disponível foi baixo em todas as classes de solos exceto em Gleissolos.

As frações granulométricas (areia, silte e argila) apresentaram comportamento semelhante entre as classes de solos, com teores de areia maior em superfície. Os Latossolos, Argissolos, Plintossolos, Gleissolos e Cambissolos apresentaram textura argilo-arenosa, Nitossolos argilosa e Neossolos arenosa.

Os teores de óxidos de Fe e Al foram elevados em todas as classes de solos. Os óxidos de Fe foram mais altos em Nitossolos e Cambissolos e os óxidos de Al foram mais altos em Latossolos e Argissolos, revelando solos mais intemperizados.

Os menores valores da relação (Fed/Fet) foram encontrados em Neossolos e Cambissolos, indicando um estágio menor de intemperização em relação a Latossolos e Nitossolos que apresentaram valores mais elevados;

Os teores médios de elementos potencialmente tóxicos disponíveis encontrados em solos do estado do Pará foram baixos, para todas as soluções extratoras e seguiram a seguinte ordem de extração: DTPA-TEA na ordem de $Fe > Al > Mn > Ba > Cu > Zn > Co > Cd > Pb$; Mehlich 1: $Al > Fe > Mn > Ba > Cu > Zn > Co > Pb > Cd$ e Mehlich 3: $Al > Fe > Mn > Ba > Cu > Co > Zn > Pb > Cd$. Os atributos do solo que mais afetam a disponibilidade dos metais são o pH, MO e os óxidos de Mn e Fe na forma amorfa.

Houve correlação positiva entre os teores de Cu, Mn e Zn extraídos por DTPA-TEA, M1 e M3. Correlações significativas foram estabelecidas entre conteúdo Cu, Mn e Zn extraído por DTPA-TEA, M1 e M3. O extrator M3 extraiu teores mais altos de Al, Fe e Pb do que os extraídos pelo DTPA-TEA e M1. O extrator M1 é mais indicado para a extração Zn, Cu, Mn, Co, Ba e Cd uma vez que correlacionou positivamente com DTPA-TEA e M3 e por se adapta facilmente a rotina dos laboratórios.

NORMAS DA REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO

1. O original deve ser encaminhado completo e revisto.
2. Deve ser enviado digitado em espaço 1,5, utilizando fonte "**Times New Roman 12**", formato A4, com 2,5 cm nas margens superior e inferior e 2,0 cm nas margens direita e esquerda.
3. O trabalho deve ser o mais claro e conciso possível. Somente em casos especiais serão aceitos trabalhos com número de páginas de texto superior a quinze.
4. Os artigos, notas e revisões deverão ser iniciados com o título do trabalho e, logo abaixo, os nomes completos dos autores. Como chamada de rodapé referente ao título, deve-se usar número-índice que poderá indicar se foi trabalho extraído de tese, ou apresentado em congresso, entidades financiadoras do projeto e, necessariamente, a data (Recebido para publicação em / /) em que o trabalho foi recebido para publicação. O cargo, o local de trabalho dos autores [endereço postal e, se possível, eletrônico (E-mail)], deverá ser inserido também no rodapé, em numeração consecutiva de chamada de números-índices colocados logo após o nome de cada autor. A condição de bolsista poderá ser incluída.
5. Os artigos deverão ser divididos, sempre que possível, em seções com cabeçalho, na seguinte ordem: **RESUMO, SUMMARY** (precedido da tradução do título para o inglês), **INTRODUÇÃO, MATERIAL E MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO, CONCLUSÕES, AGRADECIMENTOS, LITERATURA CITADA.**

Não há necessidade dessa subdivisão para os artigos sobre educação, revisões de literatura e notas científicas, embora devam ter, obrigatoriamente, **RESUMO e SUMMARY.**

Tais seções devem ser constituídas de:

- 5.1. **TÍTULO** do trabalho que deve ser conciso e indicar o seu conteúdo.
- 5.2. **RESUMO** que deve apresentar, objetivamente, uma breve frase introdutória, que justifique o trabalho, o que foi feito e estudado, os mais importantes resultados e conclusões. Será seguido da indicação dos termos de indexação, diferentes daqueles constantes do título. A tradução do **RESUMO** para o inglês constituirá o **SUMMARY.**
- 5.3. **INTRODUÇÃO** que deve ser breve, esclarecendo o tipo de problema abordado ou a(s) hipótese(s) de trabalho, com citação da bibliografia específica e finalizar com a indicação do objetivo do trabalho.
- 5.4. **MATERIAL E MÉTODOS** em que devem ser reunidas informações necessárias e suficientes que possibilitem a repetição do trabalho por outros pesquisadores.
- 5.5. **RESULTADOS** que devem conter uma apresentação concisa dos dados obtidos. Quadros ou figuras devem ser preparados sem dados supérfluos.

5.6. **DISCUSSÃO** que deve conter os resultados analisados, levando em conta a literatura, mas sem introdução de novos dados.

5.7. **CONCLUSÕES** que devem basear-se somente nos dados apresentados no trabalho e deverão ser numeradas.

5.8. **AGRADECIMENTOS** devem ser sucintos e não aparecer no texto ou em notas de rodapé.

5.9. **LITERATURA CITADA**, incluindo trabalhos citados no texto, quadro(s) ou figura(s) e inserida em ordem alfabética e da seguinte forma:

a. Periódicos: Nome de todos os autores, Título do artigo. Título abreviado do periódico, volume: páginas inicial e final, ano de publicação. Exemplo:

FONSECA, J.A. & MEURER, E.J. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. R. Bras. Ci. Solo, 21:47-50, 1997.

b. Livro: Autores. Título da publicação. Número da edição. Local, Editora, ano de publicação. Número de páginas. Exemplo:

KONHNKE, H. Soil physics. 2.ed. New York, MacGraw Hill, 1969. 224p.

c. Participação em obra coletiva: Autores. Título da parte referenciada seguida de In: Nome do editor. Título da publicação, número da edição. Local de Publicação, Editora, ano. Páginas inicial e final. Exemplos:

- *Capítulo de livro:*

JACKSON, M.L. Chemical composition of soil. In: BEAR, F.E., ed. Chemistry of the soil. 2.ed. New York, Reinhold, 1964. p.71-141.

d. **Trabalho em Anais:**

VETTORI, L. Ferro "livre" por cálculo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Campinas, 1975. Anais. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1976. p.127-128.

e. **CD-ROM:**

SILVA, M.L.N.; FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P. & CURI, N. Índice de erosividade de chuva da região de Goiânia (GO). In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO. 13., 1996. Anais. Águas de Lindóia, Embrapa, 1996. CD-ROM

f. **Internet:**

EL NIÑO and La Niña. Disponível em: < http://www.stormfax.com/el_nino.htm>. Acesso em 15 out. 2000.

As abreviações de nome de revistas devem ser feitas de acordo com as usadas pelos "abstracting journals", como dos Commonwealth Agricultural Bureaux.

6. As Referências no texto deverão ser feitas na forma: Silva & Smith (1975) ou (Silva & Smith, 1975). Quando houver mais de dois autores, usar a forma reduzida: (Souza et al., 1975). Referências a dois ou mais artigos do(s) mesmo(s) autor(es), no mesmo ano, serão discriminadas com letras minúsculas (Ex.: Silva, 1975a,b).
7. Os quadros deverão ser numerados com algarismos arábicos, sempre providos de um título claro e conciso e construídos de modo a serem auto-explicativos. Não usar linhas verticais. As linhas horizontais devem aparecer para separar o título do cabeçalho e este do conteúdo, além de uma ao final do quadro. O quadro deve ser feito por meio de uma tabela (MICROSOFT WORD/TABELA/INSERIR TABELA), no qual cada valor deve ser digitado em células distintas, estando centralizado e alinhado.
8. Os gráficos deverão ser preparados, utilizando-se "Softwares" compatíveis com "Microsoft Windows" ("Excel", "Power Point", "Sigma Plot", etc.). Para fotos e mapas coloridos utilizar resolução de 150 a 300 DPI. Não serão aceitas figuras que repitam informações de quadros.
9. Fotos coloridas, quando imprescindíveis, a critério da Comissão Editorial, serão, também, aceitas. Os custos adicionais deverão ser cobertos pelos autores.