

LEO JAKSON DA SILVA MOREIRA

**QUÍMICA, FÍSICA, MINERALOGIA E TEORES DE METAIS PESADOS EM
SOLOS DO ESTADO DO AMAZONAS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

M838q
2016
Moreira, Leo Jakson da Silva, 1985-
Química, física, mineralogia e teores de metais pesados em
solos do estado do Amazonas / Leo Jakson da Silva Moreira. –
Viçosa, MG, 2016.
162f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Análise - Amazonas. 2. Minerologia do solo.
3. Solos - Metais pesados. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

LEO JAKSON DA SILVA MOREIRA

**QUÍMICA, FÍSICA, MINERALOGIA E TEORES DE METAIS PESADOS EM
SOLOS DO ESTADO DO AMAZONAS**

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

APROVADA: 29 de Setembro de 2016.

Raphael Bragança Alves Fernandes

Diego Lang Burak

João Carlos Ker
(Coorientador)

Carlos Roberto Bellato

Maurício Paulo Ferreira Fontes
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de estudar em uma das melhores universidades do Brasil.

Ao Departamento de Solos, que me acolheu desde o Mestrado Sanduíche.

Ao Professor Maurício Paulo Ferreira Fontes, que desde o período de Mestrado Sanduíche me acolheu, pelos ensinamentos, compreensão, paciência e incentivo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, que propiciou as condições necessárias e o melhor ambiente para a realização deste Doutorado. Em especial ao Prof. Liovando Marciano da Costa, pelo apoio durante este período em Viçosa – MG, bem como à nossa querida e amável secretária Luciana de Castro Freitas.

À CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos no Brasil e no exterior.

Aos professores do Departamento de Solos, que de forma brilhante e paciente são capazes de transformar o conhecimento em algo leve e agradável, o que muito contribuiu para minha capacitação e desenvolvimento profissional. Em especial ao Prof. João Carlos Ker, pelos ensinamentos sobre os desafios da Pedologia e pelos encorajamentos dados.

Ao Prof. Walter Antônio Pereira Abrahão – UFV pelas sugestões dadas antes da etapa de coleta dos solos. Além disso, ao Gilvan Coimbra Martins – EMBRAPA OCIDENTAL, Prof. Milton César Costa Campos – UFAM, Prof. José Furtado de Miranda – UFAM, Prof. Manuel de Jesus de Souza Miranda e Claudécir Barreto – IFES São Gabriel da Cachoeira, Sidney Souza de Araújo e Daniel – IDAM pela estimada ajuda em vários aspectos durante os dias de árdua coleta de solos no estado do Amazonas.

Aos membros da banca examinadora, professores Diego Lang Burak, Carlos Roberto Bellato, Raphael Bragança Alves Fernandes e João Carlos Ker, pelas sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

À Professora Lena Qiying. Ma pelos ensinamentos e apoio durante o período do Doutorado Sanduíche na Universidade da Flórida e por ter me apresentado outras facetas da Ciência do Solo, me ajudando a colaborar com pesquisas de maior impacto e relevância para a sociedade, abrindo assim uma janela para o futuro.

À minha esposa Camila Campos Lopes Moreira, pela dedicação, amor, carinho e atenção de sempre, mas principalmente pela paciência durante meu período de Doutorado Sanduíche na Universidade da Flórida.

Aos meus pais, Francisco Jamil Moreira e Ângela Maria da Silva, por todo esforço feito, pelo amor, carinho e ensinamentos que me tornaram capaz de superar as dificuldades e desafios na vida.

À minha família como um todo: aos meus irmãos Alex, Clara e Antoni; à minha tia Cezinha; aos meus sogros Francisco Alberto e Wilka Holanda; à Dona Beni pelo carinho e atenção; aos meus cunhados Isaías Neto e Karyne Campos e a todos que de alguma forma também participaram desta conquista.

Ao meu amigo José Francisco Dias (Chico da Mineralogia) pela paciência, pelos ensinamentos, momentos de descontração, brincadeiras, pelo café, pela disponibilidade e ajuda durante as análises de laboratório.

Aos amigos que fiz durante o Doutorado e o Mestrado: Aridiano, Lauana, Lucas, Vanessa, Rafaella, Fernanda, Natália, Cristiano, Lorena, Guilherme, Anderson, Silmara, Luís Anibal, Renato, Luiz Tamure e Luiz Paulo.

Aos amigos Evandro Barbosa, Letúzia e Peng Gao da Universidade da Flórida pelo apoio, ajuda, momentos de descontração, pelo café das 10 horas e pela relevante troca de experiência profissional e pessoal durante o Doutorado Sanduíche.

Aos amigos do Departamento de Solos, que foram conquistados ao longo tempo: Ciro, Hélderson, Rafael, Fernando, Zélia, Leiliane, Mário (Grande Mário), Carlinhos, Carlos Fonseca, Cláudio, Luís Carlos Rodrigues (Lula), Janilson, Geraldo Robésio e Edimaldo.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que de alguma maneira contribuíram para esta conquista. Por menor que tenha sido, foi uma grande contribuição! OBRIGADO!

RESUMO

MOREIRA, Leo Jakson da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2016. **Química, física, mineralogia e teores de metais pesados em solos do estado do Amazonas**. Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Coorientador: João Carlos Ker.

A Floresta Amazônica é um importante bioma brasileiro e encontra-se pressionada pelo crescimento econômico do país nas últimas décadas, o que tem contribuído para a degradação de seus recursos naturais. O desenvolvimento de cidades, indústrias e da agricultura promovem a emissão de compostos químicos danosos ao ambiente, dentre eles os metais pesados, que são oriundos principalmente da queima de combustíveis fósseis, do uso de inseticidas, pesticidas, herbicidas, de aterros sanitários, rejeitos de mineração e outros. Assim, a quantificação dos teores naturais de metais nos solos, bem como o conhecimento de suas principais características, apresenta-se de grande relevância na preservação e manutenção deste recurso natural. O objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização química, física e mineralógica de solos do estado do Amazonas – Brasil, bem como quantificar os teores de metais pesados nos mesmos e, conseqüentemente, definir os Valores de Referência de Qualidade (VRQ's) desses metais. Além disso, foram conduzidos estudos de particionamento, bioacessibilidade e avaliação de risco em uma amostra de solo que apresentou elevado teor de cromo. Os resultados de caracterização química, física e mineralógica dos solos indicaram a presença de solos distintos na região. Os solos de várzea, que recebem contribuição de sedimentos provenientes dos Andes, apresentaram mineralogia expansiva, maior fertilidade natural e potencial para uso agrícola, diferenciando-se dos demais. Observou-se uma distinção entre os solos de terra firme associada principalmente aos atributos de fertilidade e à mineralogia, o que reflete os diferentes materiais de origem da região. Solos de maior riqueza em nutrientes e com mineralogia expansiva foram encontrados principalmente na região do Alto Solimões, tendo como material de origem os sedimentos da Formação Solimões. Já os solos de menor fertilidade e mineralogia do tipo gibbsítica foram encontrados predominantemente nas regiões sudeste e noroeste do estado, sendo formados sobre rochas ígneas e metamórficas dos escudos das Guianas e Brasil Central. De maneira geral, os teores de metais pesados nos solos são baixos, sendo os teores mais elevados obtidos em solos formados sobre rochas ígneas e metamórficas. Os solos de várzea (Gleissolos e Neossolos Flúvicos) apresentaram os maiores teores de elementos

considerados de maior mobilidade, tais como Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Cu e Mn. Já os solos de terra firme apresentaram os maiores teores de elementos considerados de menor mobilidade, como Fe, Cr, V, Ti, Zr e Al. Para o estado do Amazonas, sugerem-se dois VRQ's por metal, sendo um para os solos de várzea e o outro para os solos de terra firme, tendo em vista que a dinâmica de metais nestes ambientes é distinta. Entre os solos estudados, um apresentou teor de Cr acima de 2000 mg kg^{-1} e os resultados das análises do referido solo indicaram que uma exposição a esta concentração apresenta-se como de potencial risco a saúde humana.

ABSTRACT

MOREIRA, Leo Jakson da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2016. **Química, física, mineralogia e teores de metais pesados em solos do estado do Amazonas**. Adviser: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-adviser: João Carlos Ker.

Amazon rainforest is an important Brazilian biome and is being pressured by economic growth in this country in the last decades, which has contributed to the degradation of their natural resources. Development of cities, industries and agriculture promote emission of harmful chemicals to the environment, including heavy metals, which are mainly from burning fossil fuels, insecticides, pesticides, herbicides, landfills, mining tailings and other. Quantification of natural levels of metals in soils and improved knowledge of the soils are of great relevance in the preservation and maintenance of this natural resource. The objective of this work was to perform the chemical, physical and mineralogical characterization of soils of the state of Amazonas - Brazil, and to quantify the heavy metal contents, consequently, to define the Quality Reference Values (QRVs) of the metals. In addition, partitioning, bioaccessibility and risk assessment studies were conducted in a soil sample that showed high chromium content. The results of chemical, physical and mineralogical characterization of the soils indicate the presence of distinct soils in the region. Soils of várzea, which receive contribution of sediments from the Andes, presented expansive mineralogy, greater natural fertility and potential for agricultural use, differing from the others. There is a difference between the terra firme soils related mainly with the attributes of the fertility and mineralogy, reflecting the different parental materials of the soils of the region. Soils richer in nutrients and with expansive mineralogy were found mainly in the region of Alto Solimões, having as parental material the sediments of the Solimões Formation. On the other hand, soils of lower fertility and with mineral of the gibbsite type were found in the southeast and northwest regions of the state, being the igneous and metamorphic rocks the parental material of the soils that are on the regions Guianas and Central Brazil. Overall, levels of heavy metals in the soils are low, being the highest contents obtained in soils formed on igneous and metamorphic rocks. Soils of Várzea (Gleysoils and Fluviac Neossol) presented the highest contents of elements considered of greater mobility, such as Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Cu and Mn. Terra firme soils presented the highest levels of elements considered to be less mobile, such as Fe, Cr, V, Ti, Zr and Al. For the state of Amazonas,

two QRVs are per metal are suggested, one for floodplain (Varzea Soils) soils and the other for terra firme soils, considering that the dynamics of metals in these environments are different. Among the studied soils, one presented Cr content above 2000 mg kg^{-1} and the results of the analyzes this soil indicate that an exposure to this concentration presents as a potential risk to human health.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	11
	REFERÊNCIAS.....	14
2	CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MINERALÓGICA DE SOLOS DO ESTADO DO AMAZONAS – BRASIL.....	15
2.1	INTRODUÇÃO.....	17
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS	19
2.2.1	Descrição geral da área de estudo	19
2.2.2	Amostragem dos solos.....	21
2.2.3	Análises químicas, físicas e mineralógicas	26
2.2.4	Estatística.....	27
2.3	RESULTADOS	27
2.3.1	Caracterização física e atributos relacionados à fertilidade dos solos	27
2.3.2	Análise multivariada dos atributos químicos e físicos dos solos.....	43
2.3.3	Caracterização química relacionada à mineralogia dos solos	47
2.3.4	Análise multivariada relacionada à mineralogia dos solos	63
2.3.5	Mineralogia da fração argila.....	67
2.4	DISCUSSÃO.....	73
2.4.1	Atributos físicos dos solos e químicos relacionados à fertilidade	73
2.4.2	Mineralogia da fração argila e análise multivariada dos atributos químicos relacionados à mineralogia dos solos.....	78
2.5	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS.....	86
3	CAPITULO 2 - METAIS PESADOS E VALORES DE REFERÊNCIA PARA SOLOS DO AMBIENTE AMAZÔNICO (AMAZONAS – BRASIL)	93
3.1	INTRODUÇÃO.....	95
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	96
3.2.1	Descrição geral da área de estudo	96
3.2.1.1	Solos do bioma Amazônia (estado do Amazonas).....	97
3.2.1.2	Geologia	98
3.2.1.3	Vegetação	99
3.2.2	Amostragem dos solos.....	100
3.2.3	Análises químicas e físicas.....	101
3.2.4	Determinação dos teores naturais dos metais nos solos	101
3.2.5	Estatística.....	103
3.3	RESULTADOS	104
3.3.1	Atributos químicos e físicos dos solos.....	104
3.3.2	Teores naturais dos metais nos solos.....	105
3.3.3	Teores naturais dos metais por classe de solo e análise multivariada.....	110
3.3.4	Valores de referência de qualidade para metais pesados.....	115
3.4	DISCUSSÃO.....	119
3.4.1	Atributos químicos e físicos dos solos.....	119
3.4.2	Teores naturais de metais pesados nos solos estudados e análise multivariada	120

3.4.3	Valores de referência de qualidade (VRQ's) para metais pesados nos solos do estado do Amazonas	123
3.4.4	Proposição de valores de referência de qualidade para metais pesados em solos de áreas de terra firme e várzea	126
3.5	CONCLUSÕES	128
	REFERÊNCIAS	130
4	CAPÍTULO 3 - BIOACESSIBILIDADE E AVALIAÇÃO DE RISCO PARA SAÚDE HUMANA DE CROMO EM UM SOLO NA FLORESTA AMAZÔNICA - BRASIL.....	137
4.1	INTRODUÇÃO	139
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	141
4.2.1	Coleta de solo e análises químicas e físicas	141
4.2.2	Extração sequencial de cromo	141
4.2.3	Separação da frações de diferentes tamanho do solo	142
4.2.4	Teores de cromo em digestão ácida	142
4.2.5	Teores de cromo hexavalente (Cr ⁶⁺).....	143
4.2.6	Bioacessibilidade de cromo em solução gástrica e pulmonar	143
4.2.7	Avaliação de risco à saúde humana.....	144
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	145
4.3.1	Atributos do solo	145
4.3.2	Extração sequencial de cromo	146
4.3.3	Teores de Cr e Cr ⁶⁺ em frações de diferentes tamanhos do solo	148
4.3.4	Bioacessibilidade de cromo <i>in vitro</i>	151
4.3.5	Avaliação de risco	152
4.4	CONCLUSÕES	155
	REFERÊNCIAS	156
	CONCLUSÕES GERAIS.....	162

1 INTRODUÇÃO GERAL

Dentre os diversos biomas existentes no Brasil, destaca-se o Amazônico, que apresenta biodiversidade e geodiversidade em números não encontrados em outra região do país. Neste bioma encontra-se a maior bacia hidrográfica do mundo, com uma área de $6,1 \times 10^6 \text{ km}^2$ de extensão, média anual de chuvas de 2460 mm e tendo uma descarga fluvial em seu estuário de $209.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Além disso, está inserida neste bioma a maior floresta tropical do mundo, a Floresta Amazônica, com uma área aproximadamente de 5 milhões de km^2 (GUYOT et al., 2007).

No entanto, essa diversidade encontra-se cada vez mais pressionada por atividades de cunho humano decorrentes do crescimento das cidades, indústrias e, principalmente pelo desmatamento para a conversão em áreas agrícolas. O desmatamento é promovido, sobretudo, para a implementação e expansão de áreas de pastagens, plantio de soja e milho e seu cultivo geralmente é superior à capacidade de uso dos solos (FEARNSIDE, 2008; RIVERO et al., 2009; MOREIRA et al., 2009).

Outro fator que contribui para o avanço do desmatamento na região Amazônica é o crescimento urbano e industrial, que promove a remoção da floresta para a construção de estradas, rodovias, centros urbanos e indústrias. Este crescimento na região tem provocado uma pressão de uso dos solos e dos sistemas aquíferos, acarretando uma série de problemas ambientais, dentre eles a contaminação do ambiente por metais pesados (ANICETO, HORBE, 2012).

Esforços têm sido realizados visando a preservação do Bioma Amazônia, como o incentivo de políticas públicas voltadas para a conservação deste bioma e que sejam pautadas nos serviços ambientais prestados pelo mesmo, dentre elas a criação de parques, reservas e estações ecológicas na região. Os resultados destes esforços podem ser observados no estado do Amazonas, que possui 95 % de sua área de floresta primária ainda preservada, sendo o estado, dentre todos os que constituem a Amazônia Legal, que apresenta a maior área de floresta nativa conservada (IBGE, 2011).

Sabe-se que a manutenção e a preservação dos recursos naturais da região Amazônica, dentre eles os solos, podem ser ainda mais fortalecidas à medida que avanços científicos sejam difundidos, de forma que políticas públicas de proteção aos recursos naturais possam ser melhor fundamentadas a partir do conhecimento gerado. Nesse contexto, é importante ressaltar que o conhecimento acerca dos solos do estado do

Amazonas aumentou principalmente por meio da elucidação da relação dos mesmos com a Floresta Amazônica.

Nesse cenário, observa-se que outras relações podem ser discutidas visando a proteção dos solos amazônicos e um maior conhecimento sobre os mesmos. Estudos sobre o comportamento e a distribuição de metais pesados de origem natural nos ambientes de terra firme e de várzea, por exemplo, ainda não foram concretizados no estado do Amazonas, sendo tais informações de extrema importância na conservação dos recursos naturais da região.

Assim, com o intuito de contribuir para o avanço do conhecimento científico acerca dos solos do estado do Amazonas e de auxiliar na fundamentação de políticas públicas de preservação dos solos e de outros recursos ambientais da região, esforços foram reunidos e os resultados destes são apresentados na presente tese, dividida em três capítulos.

O primeiro capítulo visa melhor compreender a distribuição dos solos do estado do Amazonas a partir de suas características químicas, físicas e mineralógicas. Além disso, tem como objetivo identificar os atributos que melhor explicam a diferenciação dos solos de terra firme, levando-se em consideração aspectos relacionados à sua gênese. Por fim, pretende-se gerar um banco de dados com as características dos solos do estado, auxiliando assim em pesquisas futuras de cunho mais aplicado.

No segundo capítulo são apresentados os resultados dos teores de metais em diferentes classes de solos do estado, formados sobre os distintos materiais de origem da região. A partir destes resultados, foram gerados os Valores de Referência de Qualidade (VRQ's) para metais pesados nos solos do estado do Amazonas (conforme direcionamento da resolução N° 420/2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2016), valores estes que podem ser usados para distinguir possíveis intervenções antrópicas de uma ocorrência natural de metais em solos. Com a definição dos VRQ's, espera-se contribuir para o fortalecimento de políticas públicas de proteção dos solos da região contra a poluição por metais pesados.

A motivação para a escrita do terceiro capítulo se deu após a identificação de um solo do estado do Amazonas com elevado teor natural de cromo (2000 mg kg^{-1}). Sabe-se que a presença de metais pesados no solo de origem geogênica muitas vezes não representa riscos à saúde humana, tendo em vista que as frações consideradas móveis tendem a ser lixivadas do perfil do solo. No entanto, metais pesados provenientes de atividades antrópicas apresentam um potencial danoso, no qual as frações de maior

mobilidade e a fração bioacessível do metal as que se apresentam com maior poder risco à saúde humana. Assim, neste capítulo são realizadas análises de laboratório que visam identificar se concentração de cromo encontrado em um solo do estado do Amazonas pode promover algum risco deletério a saúde humana. Além disso, são empregadas análises que fazem a simulação dos fluidos gástrico e pulmonar, visando quantificar a fração bioacessível de Cr do solo. A partir disso, são feitas avaliações de riscos que buscam identificar possíveis riscos de câncer diante da exposição a este teor de cromo no solo.

REFERÊNCIAS

ANICETO, K. C. P., HORBE, A. M. C. Solos urbanos formados pelo acúmulo de resíduos em Manaus, Amazonas, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 42, p. 135 – 148, 2012.

CONAMA – **CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE**, 2009. Resolução nº 420/2009. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf> Acesso em Janeiro, 2016.

FEARNSIDE, P. M. Amazon forest maintenance as a source of environmental services. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, p. 101 – 114, 2008.

GUYOT, J. L., JOUANNEAU, J. M., SOARES, L., BOAVENTURA, G. R., MAILET, N., LAGANE, C. Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. **Catena**, v. 71, p. 340-356, 2007.

IBGE. **Geoestatísticas de Recursos Naturais da Amazônia Legal**. 2003. Estudos e Pesquisas, Informações Geográficas no 8. Rio de Janeiro, R.J. 2011.

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. **Science Total Environment**, v. 408, p. 349 – 355, 2009.

RIVERO, S., ALMEIDA, O., ÁVILA, S., OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v.19, p. 41 – 66, 2009.

2 **CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MINERALÓGICA DE SOLOS DO ESTADO DO AMAZONAS – BRASIL**

RESUMO

A região Amazônica possui uma grande vegetação de floresta equatorial, sustentada por solos de terra firme (não inundados) e de várzea (periodicamente inundados), que têm fertilidades distintas e são formados sobre diferentes materiais de origem. Os estudos sobre solos do estado do Amazonas são desafiadores, tendo em vista a área territorial do estado e as limitações físicas impostas pela natureza. Assim, objetivou-se compreender a gênese e a mineralogia desses solos a partir de dados físicos, químicos e mineralógicos. Amostras de solo foram coletadas em 71 pontos (em áreas sob o domínio de diferentes classes de solos), analisadas nas camadas de 0 – 20 e 80 – 100 cm e submetidas a análises físicas, químicas e mineralógicas, visando a caracterização das mesmas. Foram utilizadas análises estatísticas uni e multivariadas, a fim de se obter uma melhor compreensão acerca da distribuição dos solos em função de seus atributos químicos, físicos e mineralógicos. Os resultados indicaram a diferenciação dos solos quanto à fertilidade, tendo os solos de várzea os maiores teores de nutrientes, maior CTC e pH próximo da neutralidade. Estes solos são formados sobre sedimentos de mineralogia do tipo 2:1, depositados durante as cheias dos rios da região. O material de origem dos solos de terra firme apresentou-se como um diferencial quanto à fertilidade e mineralogia destes solos. Solos formados sobre sedimentos da Formação Solimões apresentaram mineralogia do tipo 2:1, maiores teores de nutrientes e maior CTC. Já os solos formados sobre a Formação Içá apresentaram mineralogia do tipo 2:1 (ilita) e do tipo 1:1 (caulinita), CTC média, menores teores de nutrientes e pH de forte a moderadamente ácido. Os solos formados sobre os sedimentos da Formação Alter do Chão, em geral, apresentaram mineralogia predominantemente caulinítica (com picos de baixa intensidade para gibbsita), baixos teores de nutrientes e uma baixa CTC. Os solos com maior grau de intemperismo, menor CTC e mineralogia próxima de gibbsítica foram encontrados sobre os Escudos das Guianas e Brasil Central. Os solos de terra firme apresentaram suas maiores diferenças químicas e mineralógicas atribuídas aos seus materiais de origem. Assim, solos formados sobre materiais mais recentes (Formação Solimões) apresentaram características de solos mais jovens (minerais 2:1, alta CTC, maiores teores de nutrientes) e os solos formados sobre rochas mais antigas (rochas ígneas e metamórficas dos Escudos das Guianas e Brasil Central) apresentaram maior grau de evolução pedogenética (mineralogia aproximadamente gibbsítica, baixa CTC, pobreza de nutrientes).

Palavras-chave: Solos de terra firme; Solos de várzea; Mineralogia do Solo; Intemperismo; Caulinita; Gibbsita.

CHEMICAL, PHYSICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF SOILS OF THE STATE OF AMAZONAS – BRAZIL

ABSTRACT

Amazon region has a large vegetation of equatorial forest, supported by terra firme soils (not flooded) and várzea (periodically flooded), which have different fertilities and are formed on different parent materials. Studies on the soils of the state of Amazonas are challenging, considering the territorial area of the state and the physical limitations imposed by nature. Thus, objective was to understand the genesis and mineralogy of these soils from physical, chemical and mineralogical data. Soil samples were collected in 71 points (in areas under the domain of different soil classes), analyzed in the 0 - 20 and 80 - 100 cm layers and submitted to physical, chemical and mineralogical analysis, aiming the characterization of the same. Univariate and multivariate statistical analysis were used in order to obtain a better understanding of the distribution of soils as a function of their chemical, physical and mineralogical attributes. Results indicated soil differentiation in terms of fertility, with várzea soils having the highest nutrient content, higher CTC and neutral reaction. These soils are formed on mineralogical sediments of type 2: 1, deposited during floods of rivers of the region. Parent material of the terra firme soils presented as a differential in the fertility and mineralogy of these soils. Soils formed on sediments of the Solimões Formation presented 2: 1 mineralogy, higher nutrient contents and higher CEC. However, the soils formed on the Içá Formation presented 2:1 (illite) and 1: 1 (kaolinite) minerals, medium CEC, lower nutrient contents, and strong to moderately acid reaction. Soils formed on the sediments of the Alter do Chão Formation, in general, presented kaolinite and gibbsite (low intensity peaks) as mineral, low nutrient contents and low CEC. Soils with higher degree of weathering, lower CEC and near gibbsite mineralogy were found on the Guiana and Central Brazil Shields. Terra firme soils presented their greatest chemical and mineralogical differences attributed to their parent materials. Thus, soils formed on more recent materials (Solimões Formation) presented characteristics of younger soils (minerals 2: 1, high CEC, higher nutrient contents) and soils formed on older rocks (igneous and metamorphic rocks of the Guiana Shields and Central Brazil) has presented a higher degree of pedogenic evolution (approximately gibbsite mineralogy, low CEC, nutrient poverty).

Keywords: Terra firme soils; Várzea soils; Soil mineralogy; Weathering; Kaolinite; Gibbsite

2.1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é o bioma de maior área no território brasileiro, ocupando cerca de 4.196.943 km² e abrangendo a maior floresta tropical do planeta (3.289.828 km² de floresta do tipo ombrófila) (IBGE, 2011). Além disso, possui a maior bacia hidrográfica (6,1 10⁶ km²) e um dos maiores rios do mundo, o rio Amazonas (GUYOT et al., 2007). A Floresta Amazônica estoca aproximadamente 93 ± 23 Pg de carbono na forma de biomassa e tem potencial de sequestro de carbono da ordem de 421 a 470 Tg ano⁻¹, o que é relevante nos dias de hoje, em que se avalia cada vez mais a capacidade que uma determinada área tem de fixar e estocar carbono (CERRI et al., 2006; RAMMING et al., 2010).

No estado do Amazonas, a Floresta Amazônica está distribuída principalmente sobre áreas não inundadas (solos de terra firme) e inundadas (solos de várzea) (SOMBROEK, 1966; SIOLI, 1984). As principais classes de solos observadas nas áreas de terra firme são os Argissolos e Latossolos, que representam, respectivamente, cerca de 45 e 26 % de toda a área do estado. Já nas áreas de várzea, os Gleissolos e os Neossolos Flúvicos são as principais classes de solos encontradas, compreendendo 9 e 1,45 % da área do estado, respectivamente (TEIXEIRA et al., 2010).

Os solos de terra firme estão distribuídos principalmente sobre rochas sedimentares das Formações Alter do Chão, Solimões e Içá e, em menor escala, sobre as rochas ígneas e metamórficas dos Escudos das Guianas e Brasil Central. Já os solos de várzea acompanham os principais rios de água barrenta da região e são formados a partir de sedimentos depositados durante os períodos de cheias (SOMBROEK, 1966; SIOLI, 1984; LIMA, 2006; CAMPOS et al., 2011, 2012; GUIMARÃES et al., 2013).

Os estudos dos solos do estado do Amazonas estão concentrados principalmente próximo da capital (Manaus) e muitos são voltados à caracterização e compreensão da gênese dos solos de maior ocorrência nesta região, como os estudos dos Gleissolos (GUIMARAES et al., 2013), das Terras Pretas de Índio (SILVA et al., 2011; LIMA et al., 2002), dos Espodossolos (HORBE et al., 2004), das características lateríticas de Latossolos e das feições redoximórficas em Gleissolos (FRITSCH et al., 2002), dos Latossolos e Espodossolos na região de Itacoatiara (BOTSCHEK et al., 1996), dos processos de ciclagem do Silício e a manutenção da caulinita em Latossolos (LUCAS et al., 1993), da ciclagem de elementos químicos em Latossolos (BRIKMANN, 1989), dos processos de formação de caulinitas (BALAN et al., 2007), dos processos envolvidos na

transformação Latossolo-Espodosolo (BRAVARD, RIGHI, 1988), dos processos de evolução dos Latossolos Amarelos (CHAUVEL, 1981), das propriedades químicas e mineralógicas de plintitas e Plintossolos (GARCIA et al., 2013) e sobre a classificação de solos da região de Presidente Figueiredo (RODRIGUES et al., 2001).

A descentralização de estudos sobre solos próximos de Manaus parece ser ainda um desafio, tendo em vista as dificuldades encontradas para a exploração de outras áreas. No entanto, esforços estão sendo feitos e estudos sobre a gênese e o manejo dos solos estão avançando em outras regiões do estado do Amazonas. Por exemplo, os estudos de Moreira et al. (2009) sobre as diferentes formas de manejo do solo na fertilidade de Cambissolos, bem como os estudos de Lima et al. (2006), Coelho et al. (2005) e Marques et al. (2002) sobre gênese e caracterização de solos na região do Alto Solimões (região oeste). Além disso, merecem destaque os trabalhos conduzidos por Aquino et al. (2016), Oliveira et al. (2015), Santos et al. (2013), Campos et al. (2011, 2012) e Martins et al. (2006), nas regiões sul e sudeste do estado, sobre a caracterização de solos sob diferentes formas de uso, caracterização de Campos Nativos e Matas, caracterização de Terras Pretas de Índio e as diferentes superfícies geomórficas que ocorrem na região.

Estudos mais específicos foram conduzidos na região do Alto Rio Negro sobre os processos envolvidos na transformação Latossolo-Espodosolo (DUBROEUCQ, VOLKOFF, 1998; MAFRA et al., 2002; LUCAS et al., 2012; ISHIDA et al., 2014;). Já na região do Médio Solimões, podem-se destacar os estudos de Horbe et al. (2007), visando identificar a mineralogia e comportamento geoquímico de solos e sedimentos do Neogeno e Quaternário, bem como o estudo de Gomes (2014) sobre funções de pedotransferência na estimativa da densidade do solo na região petrolífera do Urucu.

Outros trabalhos de maiores proporções e abrangência também foram conduzidos visando um melhor entendimento sobre os diferentes ambientes da região Amazônica. Moreira e Fageria (2009) conduziram um estudo sobre a fertilidade dos solos do estado do Amazonas utilizando os dados do Projeto Radam Brasil dos anos 1975 – 2005, com base em 3340 amostras de solos obtidas na profundidade de 0 – 20 cm. Quesada et al. (2011) também conduziram estudos sobre a fertilidade e gênese dos solos do estado e identificaram a contínua evolução dos solos da região Amazônica e a relação direta da fertilidade dos solos com o material de origem.

No entanto, observa-se que existe uma lacuna no conhecimento sobre a gênese dos diferentes tipos de solos do estado do Amazonas, bem como sua relação com os diferentes materiais de origem que ocorrem na região (de natureza sedimentar, ígnea e

metamórfica). Nesse contexto, há necessidade de se aprofundar, por exemplo, estudos acerca dos solos desenvolvidos sobre rochas sedimentares da Bacia do Solimões e sobre os solos formados sobre rochas ígneas e metamórficas dos Escudos das Guianas e Brasil Central.

Assim, a hipótese do presente trabalho está pautada em que os solos de várzea e os solos formados sobre sedimentos da Formação Solimões serão mais férteis que os solos de áreas mais estáveis e estabelecidos nas áreas de terra firme, em função da sua mineralogia. Desta forma, objetivou-se caracterizar os solos de terra firme e de várzea de diferentes localidades do estado do Amazonas - Brasil quanto à sua natureza física, química e mineralógica, estabelecendo relações desses atributos com os processos de gênese dos solos, contribuindo assim para a elaboração de um banco de dados acerca dos solos do estado.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Descrição geral da área de estudo

O estado do Amazonas abrange uma área de 1.559.159,148 km², sendo o estado de maior área territorial do Brasil (Figura 1), e apresenta uma população estimada em 3.939.336 habitantes, dos quais 80 % vivem em zonas urbanas e o restante vive nas zonas rurais (IBGE, 2016). O clima do estado, de acordo com a classificação de Köppen, é dividido em dois tipos: Afi (clima tropical chuvoso sem estação seca) e Ami (clima tropical chuvoso com pequeno período seco). A área apresenta ainda uma temperatura média anual de 25,9 °C, precipitação média de 2536 mm por ano e evapotranspiração média anual de 1542 mm (VIEIRA; SANTOS, 1987).

As bacias sedimentares do Acre, Solimões (450.000 km²), Amazonas (480.000 km²) e Alto Tapajós (135.000 km²) são as principais feições geológicas do estado do Amazonas. Tais bacias estão depositadas sobre um substrato rochoso pré-cambriano, onde ocorrem rochas de natureza ígnea, sedimentar e metamórfica (Figura 1) (REIS, ALMEIDA, 2010). As bacias sedimentares encontradas no estado apresentam os arenitos, siltitos e argilitos como suas principais rochas constituintes.

As rochas ígneas e metamórficas da região estão associadas às áreas pré-cambrianas, representadas por áreas estáveis, como os Escudos das Guianas e Brasil Central, situados ao norte e sul da Bacia Amazônica, respectivamente (REIS, ALMEIDA,

2010). Nestes escudos, as principais rochas encontradas são os granitos alcalinos e gnaisses, no entanto, outras rochas como xisto-verde, diabásio e anfibolitos podem ser encontradas.

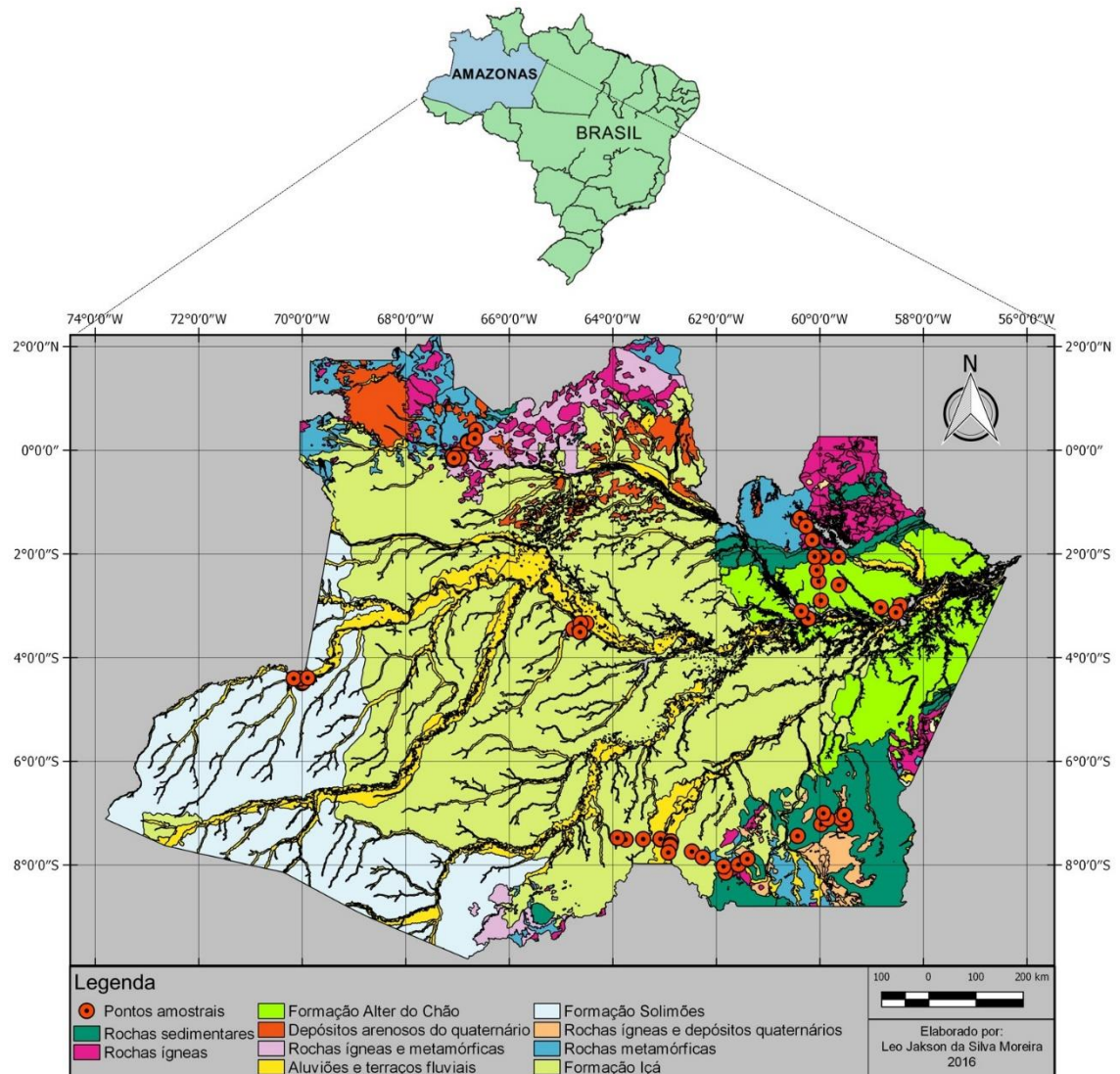


Figura 1 - Principais ocorrências geológicas do estado do Amazonas – Brasil e pontos de coleta dos solos analisados no presente estudo.

O estado do Amazonas é caracterizado pelo predomínio de cotas altimétricas inferiores a 200 m, formando os baixos platôs e tabuleiros, que estão associados às bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões. No entanto, cotas próximas a 3000 m são encontradas na região norte do estado (Figura 2), onde está situado o pico da Neblina (2994 m), um dos pontos de maior altitude do território nacional (DANTAS, MAIA, 2010).

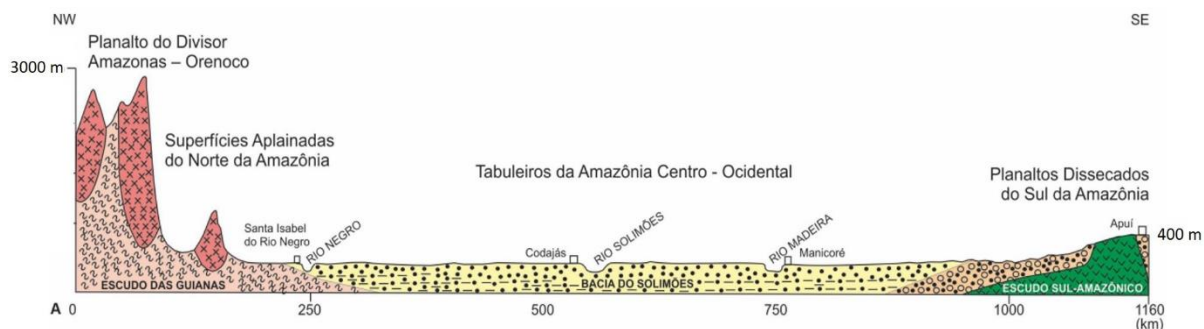


Figura 2 – Perfil geomorfológico NW-SE (Noroeste-Sudeste) do estado do Amazonas – Brasil (Fonte: Adaptado de Dantas e Maia, 2010).

No estado do Amazonas, destacam-se quatro regiões fitoecológicas: floresta ombrófila densa, floresta ombrófila aberta, região de campinaranas e savana (IBGE, 2010b). A floresta ombrófila densa predomina na maior parte do estado, tanto nas áreas de várzea quanto nas áreas mais elevadas, com altitude superior a 2000 m. A floresta ombrófila aberta apresenta como característica principal a presença de espécies arbóreas de menor porte (altura média de 25 m), com maior espaçamento entre indivíduos, apresentando como espécies principais as palmeiras e bambus (IBGE, 2010b).

As campinaranas são vegetações adaptadas à baixa fertilidade do solo, pois sua ocorrência está associada às classes dos Espodosolos e Neossolos Quartzarênicos hidromórficos. As savanas que ocorrem no estado do Amazonas têm sua fisionomia homóloga às da Venezuela, África e Ásia e apresentam vegetação xeromorfa, na qual as espécies vegetais convivem com mais ou menos cinco meses de seca. Geralmente este tipo de vegetação está associado a solos arenosos, com elevados teores de alumínio e em contato direto com as florestas ombrófilas abertas (IBGE, 2010b).

2.2.2 Amostragem dos solos

A partir da análise conjunta do mapa pedológico (IBGE, 2010a) e geológico (CPRM, 2006) do estado do Amazonas, foram definidas áreas para a coleta de amostras, levando-se em consideração a representatividade dos diferentes materiais de origem e a ocorrência dos solos do estado. Dessa forma, foram selecionados os municípios de Manaus (capital), Presidente Figueiredo, Iranduba, Manacapuru, Itacoatiara, Humaitá, Manicoré, Apuí, Lábrea, Benjamin Constant, Atalaia do Norte, São Gabriel da Cachoeira e Tefé.

Ao todo, foram coletadas 71 amostras de solos (Tabela 1) em áreas de floresta nativa ou remanescente, com o mínimo de atividade antrópica (Figura 1) com o uso de

trado do tipo holandês. As amostras utilizadas neste estudo são do tipo composta na profundidade de 0 – 20 cm (formadas por 10 subamostras) e foram coletadas assumindo que toda essa profundidade seja referente ao horizonte A dos solos amostrados, enquanto que as amostras coletadas na profundidade de 80 – 100 cm (formadas por 3 subamostras) representam o horizonte B ou a camada C dos solos.

Tabela 1 – Localização, formação geológica e material de origem do solos estudados.

Amostras	Municípios	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Formações geológicas	Materiais de origem
LATOSSOLOS						
1	Manaus	2°54'3.43"S	59°58'54.65"O	133	Alter do Chão	Argilitos
2	Manaus	2°31'50.64"S	60° 1'55.38"O	95	Alter do Chão	Argilitos
3	Presidente Figueiredo	2° 3'7.80"S	59°38'30.59"O	166	Trombetas/Alter do Chão	Argilitos e folhelhos
4	Presidente Figueiredo	2° 3'11.87"S	60° 6'2.48"O	79	Alter do Chão	Argilitos
5	Rio Preto da Eva	2°35'55.27"S	59°38'3.81"O	67	Alter do Chão	Argilitos
6	Itacoatiara	3° 2'4.39"S	58°49'41.58"O	114	Alter do Chão	Argilitos
7	Humaitá	7°51'18.74"S	62°15'51.07"O	80	Suíte Intrusiva São Romão/Iça	Granitos
8	Manicoré	7°59'59.07"S	61°34'27.55"O	127	Suíte Intrusiva Serra da Providência	Granitos
9	Manicoré	7°53'4.02"S	61°24'2.87"O	95	Içá	Argilitos, arenitos finos e siltitos
10	Apuí	7°13'0.07"S	59°58'38.58"O	145	Ipixuna	Arenitos com intrusão de diques de diabásio
11	Apuí	7° 2'9.33"S	59°31'31.45"O	208	Ipixuna/Beneficiente	Arenitos com intrusão de diques de diabásio
12	Apuí	7° 6'47.81"S	59°51'18.96"O	148	Ipixuna	Arenitos com intrusão de diques de diabásio
13	Apuí	7° 0'5.66"S	59°55'58.82"O	142	Ipixuna	Arenitos com intrusão de diques de diabásio
14	São Gabriel da Cachoeira	0° 4'51.40"S	67° 4'26.92"O	107	Suíte Intrusiva Rio Uaupés	Granitos
15	São Gabriel da Cachoeira	0° 6'38.06"S	67° 6'9.29"O	110	Suíte Intrusiva Rio Uaupés	Granitos
16	São Gabriel da Cachoeira	0° 2'11.67"S	66°56'15.82"O	89	Complexo Cauaburi - Fácies Santa Izabel do Rio Negro	Granitos e gnaisses
17	São Gabriel da Cachoeira	0° 1'10.05"N	66°54'12.97"O	138	Complexo Cauaburi - Fácies Santa Izabel do Rio Negro	Granitos e gnaisses
18	São Gabriel da Cachoeira	0°10'13.23"N	66°47'59.24"O	88	Complexo Cauaburi - Fácies Tarsira	Granitos e gnaisses
19	São Gabriel da Cachoeira	0° 4'52.03"S	67° 0'33.78"O	78	Suíte Intrusiva Rio Uaupés	Granitos
20	São Gabriel da Cachoeira	0°13'32.94"N	66°40'11.63"O	120	Complexo Cauaburi - Fácies Tarsira	Granitos e gnaisses
ARGISSOLOS						
21	Rio Preto da Eva	2°31'51.77"S	60° 1'28.50"O	77	Alter do Chão	Arenitos
22	Manaus	2°18'47.85"S	60° 3'40.89"O	79	Alter do Chão	Arenitos
23	Presidente Figueiredo	1°18'24.76"S	60°22'51.72"O	85	Suíte Intrusiva Mapuera	Granitos
24	Presidente Figueiredo	1°43'53.99"S	60° 9'7.27"O	104	Suíte Intrusiva Mapuera	Granitos
25	Presidente Figueiredo	1°27'59.88"S	60°16'5.30"O	79	Suíte Intrusiva Mapuera	Granitos
26	Irاندuba	3°14'49.76"S	60°13'31.59"O	57	Alter do Chão	Arenitos/Argilitos
27	Irاندuba	3° 6'16.10"S	60°21'51.63"O	67	Alter do Chão	Arenitos/Argilitos

Continua...

Tabela 1 – Continuação...

Amostras	Municípios	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Formações geológicas	Materiais de origem
ARGISSOLOS						
28	Rio Preto da Eva	2°35'55.21"S	59°38'3.87"O	75	Alter do Chão	Arenitos/Argilitos
29	Humaitá	7°29'55.36"S	63° 4'52.10"O	80	Terraços Fluviais	Depósitos sedimentares de argila, areia e cascalho
30	Humaitá	7°44'30.99"S	62°28'22.74"O	41	Içá	Arenitos finos, siltitos e argilitos
31	Manicoré	8° 1'40.76"S	61°51'44.05"O	127	Suíte Intrusiva Serra da Providência	Granitos
32	Manicoré	7°59'51.11"S	61°34'36.38"O	135	Suíte Intrusiva Serra da Providência	Granitos
33	Apuí	7°26'27.65"S	60°25'52.32"O	123	Beneficente	Arenitos e siltitos
34	Apuí	7°13'8.02"S	59°29'54.37"O	117	Ipixuna/Colider	Arenitos com intrusão de diques de diabásio/basalto, andesito
35	Benjamin Constant	4°25'50.74"S	70° 0'1.78"O	116	Solimões	Argilitos avermelhados a acizentados, arenitos conchíferos
36	Benjamin Constant	4°24'20.91"S	70° 2'44.59"O	96	Solimões	Argilitos avermelhados a acizentados, arenitos conchíferos
37	Atalaia do Norte	4°24'12.37"S	70°10'2.26"O	105	Solimões	Argilitos avermelhados a acizentados, arenitos conchíferos
38	São Gabriel da Cachoeira	0°23'37.14"N	66°38'29.46"O	99	Complexo Cauaburi - Fácies Tarsira	Granitos e gnaisses
39	São Gabriel da Cachoeira	0° 8'28.84"N	66°48'8.22"O	91	Complexo Cauaburi - Fácies Tarsira	Granitos e gnaisses
40	Tefé	3°26'43.00"S	64°45'54.03"O	45	Içá	Arenitos finos, siltitos e argilitos
NEOSSOLOS FLÚVICOS – NF						
41	Humaitá	7°36'38.77"S	62°53'32.98"O	35	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
42	Humaitá	7°45'38.98"S	62°55'43.37"O	92	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
43	Benjamin Constant	4°23'34.16"S	69°53'50.00"O	39	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
44	Benjamin Constant	4°23'26.37"S	69°53'47.96"O	68	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
45	Tefé	3°20'40.18"S	64°35'53.38"O	41	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
46	Tefé	3°20'11.83"S	64°37'22.91"O	55	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
CAMBISSOLOS						
47	Humaitá	7°30'22.88"S	63° 4'57.14"O	60	Terraços Fluviais	Depósitos sedimentares de argila, areia e cascalho
48	Canutama	7°30'7.44"S	63°24'53.10"O	69	Içá	Arenitos finos, siltitos e argilitos
49	Canutama	7°30'37.38"S	63°45'17.20"O	85	Içá	Arenitos finos, siltitos e argilitos
50	Canutama	7°28'40.84"S	63°54'43.99"O	104	Içá	Arenitos finos, siltitos e argilitos
51	Benjamin Constant	4°25'50.30"S	70° 0'19.80"O	114	Solimões	Argilitos avermelhados a acizentados, arenitos conchíferos
52	Benjamin Constant	4°29'31.25"S	70° 0'30.70"O	104	Solimões	Argilitos avermelhados a acizentados, arenitos conchíferos
53	Benjamin Constant	4°28'12.65"S	69°59'0.68"O	96	Solimões	Argilitos avermelhados a acizentados, arenitos conchíferos

Continua...

Tabela 1 – Continuação...

Amostras	Municípios	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Formações geológicas	Materiais de origem
ESPODOSSOLOS						
54	Presidente Figueiredo	2° 3'27.14"S	59°55'47.05"O	105	Trombetas	Arenitos e folhelhos
55	Presidente Figueiredo	1°21'50.71"S	60°25'23.87"O	73	Suíte Intrusiva Mapuera	Granitos
56	São Gabriel da Cachoeira	0° 8'32.33"S	66°56'19.00"O	77	Suíte Intrusiva Rio Uaupés	Granitos
57	São Gabriel da Cachoeira	0° 9'25.26"S	66°57'9.69"O	49	Suíte Intrusiva Rio Uaupés	Granitos
58	São Gabriel da Cachoeira	0°11'6.91"S	67° 4'59.82"O	74	Complexo Cauaburi - Fácies Santa Izabel do Rio Negro	Granitos e gnaisses
GLEISSOLOS						
59	Itacoatiara	3° 7'47.09"S	58°31'54.69"O	34	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
60	Humaitá	7°30'16.26"S	63° 4'57.27"O	67	Terraços Fluviais	Depósitos sedimentares de argila, areia e cascalho
61	Humaitá	7°32'44.37"S	62°52'39.27"O	33	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
62	Humaitá	7°38'27.40"S	62°53'33.30"O	67	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
63	Maraã	3°20'12.63"S	64°30'39.33"O	58	Depósitos de planícies aluvionares	Sedimentos arenosos a argilosos semiconsolidados
PLINTOSSOLOS						
64	Itacoatiara	2°59'33.55"S	58°27'1.74"O	27	Alter do Chão	Arenitos/ argilitos
65	Manicoré	8° 8'46.63"S	61°49'24.20"O	129	Palmeiral	Quartzo arenitos e arenitos arcoseanos
66	Tefé	3°30'13.80"S	64°38'23.48"O	62	Içá	Arenitos/argilitos
67	Tefé	3°30'27.19"S	64°38'4.33"O	61	Içá	Arenitos finos/argilitos
TERRA PRETA DE ÍNDIO – TPI						
68	Irاندuba	3°15'10.53"S	60°13'45.32"O	53	Alter do Chão	Argilitos/Arenitos
69	Manicoré	7°59'46.57"S	61°34'31.63"O	172	Suíte Intrusiva Serra da Providência	Granitos
70	Apuí	7° 6'24.45"S	59°35'57.39"O	96	Ipixuna	Arenitos com intrusão de diques de diabásio
71	São Gabriel da Cachoeira	0° 9'17.17"S	67° 4'8.74"O	88	Suíte Intrusiva Rio Uaupés	Granitos

2.2.3 Análises químicas, físicas e mineralógicas

Os procedimentos analíticos para caracterização química e física das amostras foram realizados conforme as metodologias descritas em EMBRAPA (2011). O pH do solo em água e em KCl foi medido em solução solo:água (1:2,5). Fósforo assimilável (P) e potássio (K⁺) foram determinados usando o extrator Mehlich 1. Os cátions trocáveis Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram determinados usando solução extratora de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L⁻¹. A acidez potencial (H⁺+Al³⁺) foi determinada usando solução extratora de acetato de cálcio (Ca(OAc)₂) 0,5 mol L⁻¹. Posteriormente, a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC) e determinada a pH 7 (CTCt), a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m) foram calculadas.

O carbono orgânico do solo foi determinado pelo método Walkley-Black sem aquecimento, que utiliza a oxidação pelo dicromato de potássio em meio ácido, seguida de titulometria de complexação com solução de sulfato ferroso (0,025 mol L⁻¹). A matéria orgânica do solo (MO) foi calculada pela seguinte fórmula: carbono orgânico do solo x 1,724 (EMBRAPA, 2011).

Para a determinação das frações granulométricas do solo foi empregado o método da pipeta, utilizando-se o hidróxido de sódio como agente dispersante. A fração areia foi separada por tamisação (peneira de 0,053 mm), enquanto as frações silte e argila foram separadas por sedimentação.

Os teores de Fe, Al, Si, Mn e Ti (expressos na forma de óxidos: Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, MnO e TiO₂) foram determinados de acordo com o método do ataque sulfúrico adotado por EMBRAPA (2011) na fração terra fina seca ao ar (TFSA). Os teores de ferro associados a óxidos de ferro cristalinos (Fe_d) foram determinados pelo método do ditionito-citrato em sistema tamponado com bicarbonato de sódio (DCB), conforme metodologia proposta por Mehra e Jakson (1960) na fração argila dos solos. Já o ferro de baixa cristalinidade (Fe_o) presente na fração argila, foi extraído utilizando-se uma solução 0,2 M de oxalato de amônio (pH 3,0) de acordo com McKeague e Day (1966).

A substituição isomórfica de Fe por Al (SI) nos solos foi calculada com base nos teores de Fe e Al extraídos em ditionito-citrato (Fe_d e Al_d) e oxalato de amônio (Fe_o e Al_o), conforme Fristsch et al. (2005), a partir da seguinte equação (1):

$$SI \text{ (cmol mol}^{-1}\text{)} = \left(\frac{\text{mol Al}_d - \text{mol Al}_o}{(\text{mol Al}_d - \text{mol Al}_o) + (\text{mol Fe}_d - \text{mol Fe}_o)} \right) * 100 \quad (1)$$

A caracterização mineralógica da fração argila foi realizada por difratometria de raios-X (DRX) em um difratômetro (Marca PanAnalytical - Modelo X'pert PRO) com tubo ânodo de cobalto. Foram analisadas as amostras de argila natural (escavadas) e desferrificada (orientadas).

2.2.4 Estatística

As análises estatísticas descritivas (média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação) foram realizadas com o auxílio do programa OriginLab® (versão 9). Visando-se atingir a distribuição normal dos dados, os mesmos foram submetidos à transformação do tipo *Box Cox* e então foi realizado a análise multivariada.

Análise de Componentes Principais (ACP), que foi conduzida visando reduzir o número de variáveis com menor poder de explicação dos resultados e enfatizando as variáveis que melhor expliquem os resultados observados foi conduzida a partir da variância no conjunto original das variáveis. Para tal procedimento foi usado a matriz de correlação dos dados em conjunto com o método de rotação Varimax, e após a rotação dos fatores, aqueles que apresentavam cargas fatoriais maior que 0,7 foram definidos como a variável que melhor explicam a variação dos dados. Foram construídos gráficos de dispersão para as cargas fatoriais das variáveis e para a carga das observações referentes as duas primeiras componentes principais extraídos por este método.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Caracterização física e atributos relacionados à fertilidade dos solos

Os resultados dos atributos químicos e físicos para cada amostra dos Latossolos, Argissolos, Neossolos Flúvicos, Cambissolos, Espodossolos, Gleissolos, Plintossolos e das Terras Pretas de Índio estão apresentados nas tabelas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente. Os resultados comparativos referentes à caracterização física dos solos nas duas profundidades analisadas podem ser visualizados na figura 3 por meio de gráfico do tipo *box plot*.

Entre os solos estudados, observa-se que a classe dos Latossolos apresentou a maior média para de teores de argila (59 e 66 dag kg⁻¹ nas profundidades 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente), enquanto os menores teores médios dessa fração foram obtidos

nos Espodosolos (8 e 5 dag kg⁻¹ para as profundidades 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente). As classes dos Argissolos e Cambissolos apresentaram, para a profundidade de 0 – 20 cm, teores médios de argila de 34 e 32 dag kg⁻¹, respectivamente, enquanto que em profundidade estes teores médios foram de 50 dag kg⁻¹ nos Argissolos e 56 dag kg⁻¹ nos Cambissolos. Já os Neossolos Flúvicos e Plintossolos apresentaram, respectivamente, teores médios de 22 e 26 dag kg⁻¹ em superfície e, em subsuperfície, seus respectivos valores médios foram de 22 e 41 dag kg⁻¹. Para as Terras Pretas de Índio, o valor médio de argila em superfície foi de 40 dag kg⁻¹, enquanto que em profundidade, a média obtida foi de 55 dag kg⁻¹.

Os Neossolos Flúvicos e Gleissolos apresentaram as maiores médias para a fração silte em superfície, com valores de 53 e 54 dag kg⁻¹, respectivamente. Em subsuperfície, os maiores valores dessa fração também foram encontrados nesses solos (média de 67 dag kg⁻¹ nos Neossolos Flúvicos e 40 dag kg⁻¹ nos Gleissolos). Já os Latossolos, Argissolos, Espodosolos, Plintossolos e as Terras Pretas de Índio apresentaram valores médios de silte inferiores a 15 dag kg⁻¹, nas duas profundidades.

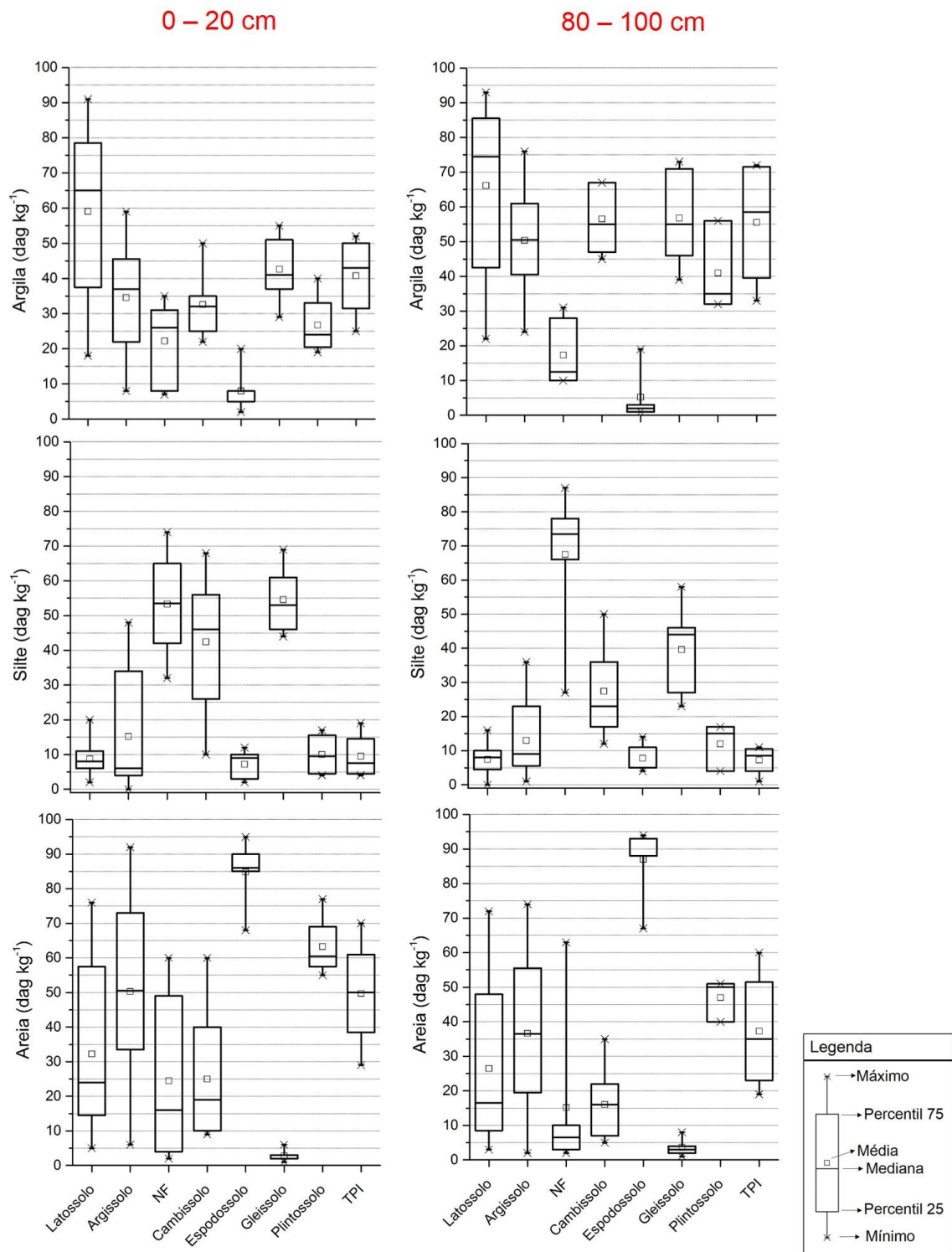


Figura 3 – Teores de argila, silte e areia dos solos estudados nas profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm.

Tabela 2 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras de Latossolos estudados.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	P -- mg dm ⁻³ --	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	SB	CTC	CTCt	V ---- % ----	m	P-Rem mg L ⁻¹	MO	Argila	Silte	Areia
LATOSSOLOS																				
1	0 - 20	4,11	3,98	-0,13	1,2	12	0,14	0,11	1,37	7,6	0,28	1,65	7,88	3,6	83	15,2	4,09	78	6	16
	80 - 100	4,83	4,43	-0,4	0,2	4	0,07	0,04	0,68	3,2	0,12	0,8	3,32	3,6	85	7,8	1,28	89	3	8
2	0 - 20	4,25	4,07	-0,18	1,3	11	0,14	0,11	1,37	7,4	0,28	1,65	7,68	3,6	83	18,7	3,97	64	7	29
	80 - 100	4,69	4,45	-0,24	0,2	1	0,08	0,02	0,39	2,9	0,1	0,49	3	3,3	79,6	9,7	1,15	82	0	18
3	0 - 20	4,88	4,38	-0,5	1,3	26	1,22	0,46	0,59	7,1	1,75	2,34	8,85	19,8	25,2	17,6	5,25	87	7	6
	80 - 100	4,96	4,38	-0,58	0,4	4	0,53	0,09	0,49	3,4	0,63	1,12	4,03	15,6	43,7	9,3	1,28	91	6	3
4	0 - 20	4,12	3,89	-0,23	1,3	19	0,11	0,12	1,85	9,8	0,28	2,13	10,08	2,8	86,9	15,8	5,37	83	8	9
	80 - 100	4,62	4,43	-0,19	0,5	4	0,06	0,04	0,78	3,5	0,11	0,89	3,61	3	87,6	7,7	1,79	92	1	7
5	0 - 20	4,44	4,17	-0,27	1,6	19	1,23	0,41	0,88	7,6	1,69	2,57	9,29	18,2	34,2	25,7	4,86	76	4	20
	80 - 100	4,8	4,29	-0,51	0,2	7	0,13	0,08	0,88	3,4	0,23	1,11	3,63	6,3	79,3	13,2	1,28	83	5	12
6	0 - 20	4,03	3,82	-0,21	2,8	16	0,12	0,11	1,85	9,2	0,27	2,12	9,47	2,9	87,3	20,9	4,86	82	6	12
	80 - 100	4,47	4,24	-0,23	0,2	3	0,05	0,03	1,27	3,7	0,09	1,36	3,79	2,4	93,4	11,3	1,02	93	0	7
7	0 - 20	3,96	4,05	0,09	1	12	0,04	0,07	2,44	8,2	0,14	2,58	8,34	1,7	94,6	25,7	3,45	31	10	59
	80 - 100	4,58	4,11	-0,47	0,4	2	0,05	0,03	2,24	3,4	0,09	2,33	3,49	2,6	96,1	21	0,64	40	13	47
8	0 - 20	4,18	4,12	-0,06	3,2	24	0,76	0,19	1,85	13,8	1,01	2,86	14,81	6,8	64,7	11,8	7,29	79	8	13
	80 - 100	4,75	4,75	0	1,8	7	0,28	0,07	0,59	5	0,37	0,96	5,37	6,9	61,5	9,8	2,43	80	8	12
9	0 - 20	3,87	3,81	-0,06	1,6	19	0,1	0,07	2,24	8,9	0,22	2,46	9,12	2,4	91,1	15,8	2,94	66	11	23
	80 - 100	4,25	4,5	0,25	0,5	24	0,07	0,01	1,07	3,5	0,14	1,21	3,64	3,8	88,4	6,4	0,9	75	11	14
10	0 - 20	4,05	4,22	0,17	2,9	37	0,09	0,11	3,71	10,3	0,29	4	10,59	2,7	92,8	13	4,99	57	20	23
	80 - 100	4,75	4,16	-0,59	0,5	16	0,02	0,03	2,73	5,6	0,09	2,82	5,69	1,6	96,8	5	1,02	69	16	15
11	0 - 20	3,92	4,02	0,1	1,4	10	0,15	0,11	1,76	11,9	0,29	2,05	12,19	2,4	85,9	18,9	6,27	67	8	25
	80 - 100	4,56	4,69	0,13	0,7	27	0,11	0,04	0,39	2,6	0,22	0,61	2,82	7,8	63,9	12,4	2,05	74	8	18
12	0 - 20	3,83	3,78	-0,05	3,8	1	0,11	0,1	1,66	13,7	0,21	1,87	13,91	1,5	88,8	17,2	7,16	91	4	5
	80 - 100	4,36	4,28	-0,08	1,7	26	0,07	0,02	2,24	5,3	0,16	2,4	5,46	2,9	93,3	5,6	1,66	88	8	4
13	0 - 20	4,06	3,97	-0,09	0,9	2	0,17	0,18	2,54	7,7	0,36	2,9	8,06	4,5	87,6	12,2	3,97	68	14	18
	80 - 100	4,54	4,63	0,09	0,2	47	0,09	0,07	0,59	2,7	0,28	0,87	2,98	9,4	67,8	1,4	0,64	77	14	9
14	0 - 20	4,43	4,1	-0,33	2	19	0,16	0,11	1,07	6,6	0,32	1,39	6,92	4,6	77	18,7	2,56	32	11	57
	80 - 100	4,64	4,55	-0,09	0,2	2	0,04	0,02	0,39	3,5	0,07	0,46	3,57	2	84,8	11,4	1,02	35	8	57

Continua...

Tabela 2 – Continuação...

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia
					-- mg dm ⁻³ --					cmol _c dm ⁻³				---- % ----		mg L ⁻¹		----- dag kg ⁻¹ -----		
LATOSSOLOS																				
15	0 – 20	4,04	4,02	-0,02	2,8	20	0,2	0,1	1,66	8,9	0,35	2,01	9,25	3,8	82,6	15,3	5,12	46	9	45
	80 - 100	4,85	4,39	-0,46	2	5	0,04	0,03	0,78	5,8	0,08	0,86	5,88	1,4	90,7	12,2	2,56	53	4	43
16	0 - 20	5,34	4,31	-1,03	1,1	20	0,12	0,07	0,88	6,1	0,24	1,12	6,34	3,8	78,6	19,4	4,18	39	2	59
	80 - 100	5,12	5,39	0,27	0,1	1	0,11	0,03	0	1,8	0,14	0,14	1,94	7,2	0	9,8	0,89	42	8	50
17	0 - 20	5,38	4,58	-0,8	1,2	13	0,09	0,06	0,78	6,1	0,18	0,96	6,28	2,9	81,3	15,5	3,93	55	16	29
	80 - 100	5,13	5,03	-0,1	0,2	1	0,12	0,04	0	2,1	0,16	0,16	2,26	7,1	0	10,9	1,39	60	12	28
18	0 - 20	3,94	4,06	0,12	2	16	0,11	0,06	1,66	7,4	0,21	1,87	7,61	2,8	88,8	22	2,91	18	6	76
	80 - 100	4,74	4,43	-0,31	0,2	0	0,13	0,02	0,68	2,9	0,15	0,83	3,05	4,9	81,9	20,1	0,38	22	6	72
19	0 - 20	5,27	4,31	-0,96	1,8	16	0,13	0,06	0,68	5,8	0,23	0,91	6,03	3,8	74,7	19,4	2,53	26	11	63
	80 - 100	4,7	4,65	-0,05	0,3	0	0,09	0,02	0,2	2,3	0,11	0,31	2,41	4,6	64,5	17,6	0,76	35	9	56
20	0 - 20	4,04	4,24	0,2	1,4	17	0,15	0,06	0,59	7,7	0,25	0,84	7,95	3,1	70,2	22,6	3,42	36	6	58
	80 - 100	4,58	4,44	-0,14	0,3	1	0,13	0,03	0,49	3,9	0,16	0,65	4,06	3,9	75,4	12,1	1,39	43	8	49
Média		4,31	4,10	-0,21	1,8	16	0,27	0,13	1,57	8,6	0,44	2,01	9,03	4,9	77,9	18,1	4,46	59	9	32
Máximo		5,38	4,58	0,20	3,8	37	1,23	0,46	3,71	13,8	1,75	4,00	14,81	19,8	94,6	25,7	7,29	91	20	76
Mínimo	0 - 20	3,83	3,78	-1,03	0,9	1	0,04	0,06	0,59	5,8	0,14	0,84	6,03	1,5	25,2	11,8	2,53	18	2	5
Percentil 75		4,44	4,23	0,04	2,4	20	0,17	0,12	1,85	9,5	0,34	2,52	9,78	4,2	88,2	20,2	5,19	79	11	58
Percentil 50		4,09	4,07	-0,11	1,5	17	0,14	0,11	1,66	7,7	0,28	2,03	8,60	3,4	83,0	18,2	4,14	65	8	24
Percentil 25		4,00	3,98	-0,30	1,3	12	0,11	0,07	0,88	7,3	0,23	1,52	7,65	2,8	75,9	15,4	3,44	38	6	15
Média		4,70	4,51	-0,19	0,5	9	0,11	0,04	0,84	3,5	0,18	1,02	3,70	5,0	71,7	10,7	1,28	66	7	26
Máximo		5,13	5,39	0,27	2,0	47	0,53	0,09	2,73	5,8	0,63	2,82	5,88	15,6	96,8	21,0	2,56	93	16	72
Mínimo	80 - 100	4,25	4,11	-0,59	0,1	0	0,02	0,01	0,00	1,8	0,07	0,14	1,94	1,4	0,0	1,4	0,38	22	0	3
Percentil 75		4,82	5,39	-0,03	0,5	12	0,13	0,04	0,39	3,8	0,19	1,17	4,05	7,0	89,6	12,3	1,53	86	10	48
Percentil 50		4,70	4,64	-0,17	0,3	4	0,09	0,03	0,64	3,4	0,14	0,87	3,59	3,9	80,8	10,4	1,22	76	8	17
Percentil 25		4,57	4,34	-0,43	0,2	1	0,06	0,02	0,98	2,8	0,10	0,55	2,99	2,8	64,2	7,8	0,90	43	5	9

Tabela 3 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras de Argissolos estudados.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia
					-- mg dm ⁻³ --	----- cmolc dm ⁻³ -----					---- % ----		mg L ⁻¹		----- dag kg ⁻¹ -----					
ARGISSOLOS																				
21	0 - 20	4,17	4,29	0,12	1,3	6	0,13	0,08	0,88	3,4	0,23	1,11	3,63	6,3	79,3	43	1,28	8	0	92
	80 - 100	4,61	4,45	-0,16	0,4	3	0,07	0,09	0,49	2,9	0,17	0,66	3,07	5,5	74,2	22,7	0,64	24	2	74
22	0 - 20	4,19	4,1	-0,09	1,1	11	0,09	0,07	0,78	4,7	0,19	0,97	4,89	3,9	80,4	30,7	1,54	20	3	77
	80 - 100	4,63	4,38	-0,25	0,3	4	0,09	0,03	0,68	2,3	0,13	0,81	2,43	5,3	84	24,6	0,64	33	7	60
23	0 - 20	4,08	4,23	0,15	0,8	18	0,1	0,09	1,37	7,1	0,24	1,61	7,34	3,3	85,1	22,6	2,69	38	6	56
	80 - 100	4,48	4,31	-0,17	0,4	7	0,09	0,05	1,07	4,7	0,16	1,23	4,86	3,3	87	18,4	1,66	46	7	47
24	0 - 20	4,61	4,13	-0,48	1,4	19	0,18	0,14	1,07	6,1	0,37	1,44	6,47	5,7	74,3	18,7	4,09	52	11	37
	80 - 100	5,29	4,9	-0,39	0,2	1	0,11	0,05	0	0,8	0,16	0,16	0,96	16,7	0	9	0,77	70	11	19
25	0 - 20	4,16	4,04	-0,12	1,1	23	0,1	0,11	1,56	7,4	0,27	1,83	7,67	3,5	85,2	18,7	3,71	50	5	45
	80 - 100	4,77	4,31	-0,46	0,4	3	0,08	0,04	0,68	5	0,13	0,81	5,13	2,5	84	13,9	1,41	55	5	40
26	0 - 20	3,88	3,95	0,07	2	15	0,11	0,09	1,85	10,6	0,24	2,09	10,84	2,2	88,5	23,1	3,71	38	4	58
	80 - 100	4,58	4,33	-0,25	0,4	2	0,09	0,03	1,17	4	0,13	1,3	4,13	3,1	90	13,1	1,02	57	1	42
27	0 - 20	4,24	3,94	-0,3	1,8	15	0,04	0,08	1,66	9,3	0,16	1,82	9,46	1,7	91,2	24,5	3,33	36	0	64
	80 - 100	4,89	4,42	-0,47	0,3	1	0,07	0,03	0,59	3,2	0,1	0,69	3,3	3	85,5	16,8	1,02	46	1	53
28	0 - 20	4,25	3,81	-0,44	1,8	20	0,12	0,1	0,98	7,4	0,27	1,25	7,67	3,5	78,4	36,5	2,81	19	3	78
	80 - 100	4,6	4,41	-0,19	0,2	1	0,03	0,02	0,59	2,9	0,05	0,64	2,95	1,7	92,2	23,7	0,77	39	3	58
29	0 - 20	4,02	3,89	-0,13	2,4	25	0,06	0,15	5,76	7,4	0,27	6,03	7,67	3,5	95,5	16,9	2,56	30	40	30
	80 - 100	4,71	3,99	-0,72	0,3	9	0,04	0,04	3,9	8,5	0,1	4	8,6	1,2	97,5	7,5	0,51	44	36	20
30	0 - 20	4,46	3,89	-0,57	1,5	17	0,06	0,08	6,05	8,7	0,18	6,23	8,88	2	97,1	22,1	2,56	18	5	77
	80 - 100	4,58	4,26	-0,32	0,3	2	0	0,02	4	4,2	0,03	4,03	4,23	0,7	99,3	16,6	0,64	30	6	64
31	0 - 20	4,74	4,12	-0,62	1,6	33	0,15	0,18	0,98	6,6	0,41	1,39	7,01	5,8	70,5	29,7	2,94	25	6	69
	80 - 100	5,05	4,66	-0,39	0,2	3	0	0,08	0,49	2,4	0,09	0,58	2,49	3,6	84,5	8,4	0,64	48	11	41
32	0 - 20	4,33	4,12	-0,21	2	59	0,79	0,41	0,68	5,2	1,35	2,03	6,55	20,6	33,5	25,6	2,69	42	8	50
	80 - 100	5,13	4,71	-0,42	0,7	7	0,09	0,12	0,29	2,6	0,23	0,52	2,83	8,1	55,8	3,9	0,38	61	16	23
33	0 - 20	3,73	3,76	0,03	1,7	0	0,12	0,13	1,56	7,2	0,25	1,81	7,45	3,4	86,2	20,7	2,94	44	5	51
	80 - 100	4,7	4,66	-0,04	0,5	2	0	0,03	0,29	2,4	0,04	0,33	2,44	1,6	87,9	8,9	0,9	61	7	32
34	0 - 20	3,66	3,52	-0,14	3,8	38	0,09	0,18	4,78	14,5	0,37	5,15	14,87	2,5	92,8	12,8	5,25	45	38	17
	80 - 100	4,38	3,98	-0,4	0,5	9	0,02	0,04	5,17	8,5	0,08	5,25	8,58	0,9	98,5	3,7	1,02	62	26	12

Continua...

Tabela 3 – Continuação...

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P	K+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia	
					-- mg dm ⁻³ --						cmolc dm ⁻³	----- % ----		mg L ⁻¹	----- dag kg ⁻¹ -----						
ARGISSOLOS																					
35	0 - 20	4,44	3,74	-0,7	3,5	41	8,11	1,03	6,15	11,8	9,25	15,4	21,05	43,9	39,9	11,9	2,56	59	35	6	
	80 - 100	4,82	3,65	-1,17	1,1	72	1,88	0,21	15,71	25,3	2,27	17,98	27,57	8,2	87,4	4,9	0,26	76	22	2	
36	0 - 20	4,14	3,82	-0,32	3,4	35	0,6	0,25	8,59	14,5	0,94	9,53	15,44	6,1	90,1	8,9	2,81	46	43	11	
	80 - 100	5,06	3,76	-1,3	0,2	64	0,13	0,12	19,22	27,5	0,41	19,63	27,91	1,5	97,9	3,8	0,38	72	24	4	
37	0 - 20	4,73	4,16	-0,57	2,1	24	4,8	0,76	0,88	5,6	5,62	6,5	11,22	50,1	13,5	23	2,17	29	48	23	
	80 - 100	5,51	3,9	-1,61	0,2	33	9,87	1,33	6,63	9	11,28	17,91	20,28	55,6	37	5	0,26	53	30	17	
38	0 - 20	3,92	3,93	0,01	3,1	28	0,18	0,1	1,66	6,6	0,35	2,01	6,95	5	82,6	28,4	2,28	14	4	82	
	80 - 100	4,77	4,51	-0,26	0,2	1	0,08	0,02	0,39	2,9	0,1	0,49	3	3,3	79,6	14,8	0,76	33	7	60	
39	0 - 20	5,22	4,28	-0,94	1,2	12	0,14	0,06	0,88	6,3	0,23	1,11	6,53	3,5	79,3	14,4	3,42	54	7	39	
	80 - 100	5,27	4,99	-0,28	0,3	0	0,1	0,03	0,1	2,1	0,13	0,23	2,23	5,8	43,5	9,3	1,27	56	13	31	
40	0 - 20	4,28	3,84	-0,44	3,5	15	0,19	0,22	3,32	9,8	0,45	3,77	10,25	4,4	88,1	17,8	3,68	24	33	43	
	80 - 100	4,68	3,97	-0,71	0,3	6	0,12	0,06	4,59	7,6	0,2	4,79	7,8	2,6	95,8	7,2	0,89	42	25	33	
Média		4,26	3,98	-0,28	2,1	23	0,81	0,22	2,57	8,0	1,08	3,65	9,09	9,0	76,6	22,5	2,95	35	15	50	
Máximo		5,22	4,29	0,15	3,8	59	8,11	1,03	8,59	14,5	9,25	15,40	21,05	50,1	97,1	43,0	5,25	59	48	92	
Mínimo	0 - 20	3,66	3,52	-0,94	0,8	0	0,04	0,06	0,68	3,4	0,16	0,97	3,63	1,7	13,5	8,9	1,28	8	0	6	
Percentil 75		4,45	4,13	-0,04	2,8	31	0,19	0,20	4,05	9,6	0,43	5,59	10,55	6,0	89,3	27,0	3,55	46	34	73	
Percentil 50		4,22	3,95	-0,26	1,8	20	0,13	0,12	1,56	7,3	0,27	1,92	7,67	3,7	83,9	22,4	2,81	37	6	51	
Percentil 25		4,05	3,83	-0,53	1,4	15	0,10	0,09	0,93	6,2	0,24	1,42	6,75	3,4	76,4	17,4	2,56	22	4	34	
Média		4,83	4,33	-0,50	0,4	12	0,65	0,12	3,30	6,4	0,80	4,10	7,24	6,7	78,1	11,8	0,79	50	13	37	
Máximo		5,51	4,99	-0,04	1,1	72	9,87	1,33	19,22	27,5	11,28	19,63	27,91	55,6	99,3	24,6	1,66	76	36	74	
Mínimo	80 - 100	4,38	3,65	-1,61	0,2	0	0,00	0,02	0,00	0,8	0,03	0,16	0,96	0,7	0,0	3,7	0,26	24	1	2	
Percentil 75		5,06	4,59	-0,25	0,4	8	1,05	0,09	4,30	8,1	0,19	4,41	8,19	5,7	94,0	16,7	1,02	61	23	56	
Percentil 50		4,74	4,36	-0,39	0,3	3	0,09	0,04	0,68	3,6	0,13	0,81	3,72	3,2	86,3	9,2	0,77	51	9	37	
Percentil 25		4,61	3,99	-0,59	0,2	2	0,04	0,03	0,44	2,5	0,10	0,55	2,66	1,7	76,9	6,1	0,58	41	6	20	

Tabela 4 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras dos Neossolos Flúvicos estudados.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia
					-- mg dm ⁻³ --	----- cmolc dm ⁻³ -----							---- % ----	mg L ⁻¹	----- dag kg ⁻¹ -----					
NEOSSOLOS FLÚVICOS																				
41	0 – 20	5,78	4,85	-0,93	62,6	39	3,32	1,5	0	1,6	4,92	4,92	6,52	75,5	0	40,3	0,9	7	44	49
	80 – 100	5,91	4,77	-1,14	11,2	47	3,59	2,15	0	2,3	5,86	5,86	8,16	71,8	0	39,5	1,15	13	77	10
42	0 – 20	6,21	5,74	-0,47	48,3	42	5,75	1,42	0	1,4	7,28	7,28	8,68	83,9	0	45,4	1,92	8	32	60
	80 - 100	5,9	4,98	-0,92	37	56	4,11	2,15	0,1	1,6	6,4	6,5	8	80	1,5	34,8	0,77	12	78	10
43	0 – 20	7,1	6,45	-0,65	104,2	60	14,36	1,77	0	1	16,28	16,28	17,28	94,2	0	25,3	2,43	21	74	5
	80 - 100	7,25	6,2	-1,05	140,7	46	18,06	3,56	0	1,4	21,74	21,74	23,14	93,9	0	29,2	1,79	28	70	2
44	0 – 20	6,75	5,8	-0,95	107,4	94	18,13	4,63	0	1,8	23	23	24,8	92,7	0	18,2	3,55	35	63	2
	80 - 100	6,47	4,98	-1,49	129	26	15	9,55	0	2,7	24,62	24,62	27,32	90,1	0	33,6	0,51	31	66	3
45	0 – 20	5,04	3,98	-1,06	6,9	45	1,56	1,52	1,07	6,1	3,2	4,27	9,3	34,4	25,1	23,5	2,66	31	42	27
	80 - 100	6,22	4,28	-1,94	116,8	20	1,34	2,37	0,29	1,8	3,76	4,05	5,56	67,6	7,2	43,1	0,38	10	27	63
46	0 – 20	5,29	4,14	-1,15	11,4	44	2,01	2,34	0,68	4,2	4,46	5,14	8,66	51,5	13,2	28,2	2,03	31	65	4
	80 - 100	6,47	4,41	-2,06	97,9	44	2,71	1,63	0	2,6	4,45	4,45	7,05	63,1	0	31,6	0,76	10	87	3
Média		6,03	5,16	-0,87	56,8	54	7,52	2,20	0,3	2,7	9,86	10,15	12,54	72,0	6,4	30,2	2,25	22	53	25
Máximo		7,10	6,45	-0,47	107,4	94	18,13	4,63	1,1	6,1	23,00	23,00	24,80	94,2	25,1	45,4	3,55	35	74	60
Mínimo	0 – 20	5,04	3,98	-1,15	6,9	39	1,56	1,42	0,0	1,0	3,20	4,27	6,52	34,4	0,0	18,2	0,90	7	32	2
Percentil 75		6,75	5,80	-0,65	104,2	60	14,36	2,34	0,7	4,2	16,28	16,28	17,28	92,7	13,2	40,3	2,66	31	65	49
Percentil 50		6,00	5,30	-0,94	55,5	45	4,54	1,65	0,0	1,7	6,10	6,21	8,99	79,7	0,0	26,8	2,23	26	54	16
Percentil 25		5,29	4,14	-1,06	11,4	42	2,01	1,50	0,0	1,4	4,46	4,92	8,66	51,5	0,0	23,5	1,92	8	42	4
Média		6,37	4,94	-1,43	88,8	40	7,47	3,57	0,1	2,1	11,14	11,20	13,21	77,8	1,5	35,3	0,89	17	68	15
Máximo		7,25	6,20	-0,92	140,7	56	18,06	9,55	0,3	2,7	24,62	24,62	27,32	93,9	7,2	43,1	1,79	31	87	63
Mínimo	80 - 100	5,90	4,28	-2,06	11,2	20	1,34	1,63	0,0	1,4	3,76	4,05	5,56	63,1	0,0	29,2	0,38	10	27	2
Percentil 75		6,47	4,98	-1,05	129,0	47	15,00	3,56	0,1	2,6	21,74	21,74	23,14	90,1	1,5	39,5	1,15	28	78	10
Percentil 50		6,35	4,88	-1,32	107,4	45	3,85	2,26	0,0	2,1	6,13	6,18	8,08	75,9	0,0	34,2	0,77	13	74	7
Percentil 25		5,91	4,41	-1,94	37,0	26	2,71	2,15	0,0	1,6	4,45	4,45	7,05	67,6	0,0	31,6	0,51	10	66	3

Tabela 5 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras dos Cambissolos estudados.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	P	K ₊	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia
					-- mg dm ⁻³ --					cmol _c dm ⁻³				--- % ---		mg L ⁻¹		----- dag kg ⁻¹ -----		
CAMBISSOLOS																				
47	0 - 20	5,15	4,16	-0,99	0,6	13	0,07	0,04	2,4	5,8	0,14	2,54	5,94	2,4	94,5	18	2,3	32	46	22
	80 - 100	5,3	3,95	-1,35	0,3	9	0,07	0,05	2,24	9,8	0,14	2,38	9,94	1,4	94,1	7,1	0,38	55	23	22
48	0 - 20	4,66	3,96	-0,7	0,7	29	0,11	0,23	3,61	8,9	0,41	4,02	9,31	4,4	89,8	16,9	3,33	22	68	10
	80 - 100	4,83	4,01	-0,82	0,2	14	0,07	0,1	5,46	8,4	0,21	5,67	8,61	2,4	96,3	5,2	0,9	62	31	7
49	0 - 20	4,2	4,1	-0,1	1,9	31	0,08	0,09	5,56	11,3	0,25	5,81	11,55	2,2	95,7	10,9	3,2	34	26	40
	80 - 100	4,69	4,09	-0,6	0,3	5	0,11	0,02	4,68	7,2	0,14	4,82	7,34	1,9	97,1	7,4	0,9	53	12	35
50	0 - 20	4,5	4,04	-0,46	1,2	36	0,07	0,18	2,54	8	0,34	2,88	8,34	4,1	88,2	16,2	3,84	25	56	19
	80 - 100	4,97	4,01	-0,96	0,2	12	0,08	0,04	4,59	7,2	0,15	4,74	7,35	2	96,8	8,2	0,38	47	36	17
51	0 - 20	4,26	4,06	-0,2	3,5	17	1,38	0,16	3,8	8	1,58	5,38	9,58	16,5	70,6	11,6	2,3	30	10	60
	80 - 100	4,89	3,71	-1,18	0,3	79	0,23	0,16	16	23,2	0,59	16,59	23,79	2,5	96,4	3,5	0,26	67	17	16
52	0 - 20	5,14	4	-1,14	3,2	33	7,16	1,44	2,34	7,2	8,68	11,02	15,88	54,7	21,2	20	2,69	35	50	15
	80 - 100	5,43	3,75	-1,68	0,3	59	11,61	0,91	12	16,7	12,67	24,67	29,37	43,1	48,6	6,1	0,26	45	50	5
53	0 - 20	4,37	3,97	-0,4	5,1	30	1,74	0,64	8,88	15,9	2,46	11,34	18,36	13,4	78,3	10,6	3,2	50	41	9
	80 - 100	4,93	3,69	-1,24	0,4	46	0,24	0,5	19,32	27,8	0,86	20,18	28,66	3	95,7	5,2	0,38	67	23	10
Média		4,61	4,04	-0,57	2,3	27	1,52	0,40	4,2	9,3	1,98	6,14	11,28	14,0	76,9	14,9	2,98	33	42	25
Máximo		5,15	4,16	-0,10	5,1	36	7,16	1,44	8,9	15,9	8,68	11,34	18,36	54,7	95,7	20,0	3,84	50	68	60
Mínimo	0 - 20	4,20	3,96	-1,14	0,6	13	0,07	0,04	2,3	5,8	0,14	2,54	5,94	2,2	21,2	10,6	2,30	22	10	9
Percentil 75		5,14	4,10	-0,20	3,5	33	1,74	0,64	5,6	11,3	2,46	11,02	15,88	16,5	94,5	18,0	3,33	35	56	40
Percentil 50		4,50	4,04	-0,46	1,9	30	0,11	0,18	3,6	8,0	0,41	5,38	9,58	4,4	88,2	16,2	3,20	32	46	19
Percentil 25		4,26	3,97	-0,99	0,7	17	0,07	0,09	2,4	7,2	0,25	2,88	8,34	2,4	70,6	10,9	2,30	25	26	10
Média		5,01	3,89	-1,12	0,3	32	1,77	0,25	9,2	14,3	2,11	11,29	16,44	8,0	89,3	6,1	0,49	57	27	16
Máximo		5,43	4,09	-0,60	0,4	79	11,61	0,91	19,3	27,8	12,67	24,67	29,37	43,1	97,1	8,2	0,90	67	50	35
Mínimo	80 - 100	4,69	3,69	-1,68	0,2	5	0,07	0,02	2,2	7,2	0,14	2,38	7,34	1,4	48,6	3,5	0,26	45	12	5
Percentil 75		5,30	4,01	-0,82	0,3	59	0,24	0,50	16,0	23,2	0,86	20,18	28,66	3,0	96,8	7,4	0,90	67	36	22
Percentil 50		4,93	3,95	-1,18	0,3	14	0,11	0,10	5,5	9,8	0,21	5,67	9,94	2,4	96,3	6,1	0,38	55	23	16
Percentil 25		4,83	3,71	-1,35	0,2	9	0,07	0,04	4,6	7,2	0,14	4,74	7,35	1,9	94,1	5,2	0,26	47	17	7

Tabela 6 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras dos Espodossolos estudados.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia
					-- mg dm ⁻³ --	----- cmol _c dm ⁻³ -----					----- % -----		mg L ⁻¹		----- dag kg ⁻¹ -----					
ESPODOSSOLOS																				
54	0 - 20	3,89	2,49	-1,4	7	19	0,19	0,18	2,34	21,9	0,42	2,76	22,32	1,9	84,8	59,1	7,68	8	2	90
	80 - 100	4,61	3,24	-1,37	1	2	0,12	0,04	0,2	2,4	0,17	0,37	2,57	6,6	54,1	59,9	0,51	2	5	93
55	0 - 20	4,82	4,02	-0,8	2,3	30	0,12	0,09	0,88	5	0,29	1,17	5,29	5,5	75,2	33	2,17	20	12	68
	80 - 100	4,79	4,09	-0,7	1,2	4	0,09	0,04	0,98	2,6	0,14	1,12	2,74	5,1	87,5	41,8	0,64	19	14	67
56	0 - 20	4,77	3,37	-1,4	28,4	53	1,21	0,75	0,49	9	2,1	2,59	11,1	18,9	18,9	59,3	6,97	5	9	86
	80 - 100	4,67	3,38	-1,29	1,4	2	0,18	0,06	0,59	3,7	0,25	0,84	3,95	6,3	70,2	56,8	1,14	3	4	93
57	0 - 20	4,35	3,15	-1,2	10,5	18	0,15	0,07	0,59	4,2	0,27	0,86	4,47	6	68,6	59,9	1,77	2	3	95
	80 - 100	4,59	3,46	-1,13	1,1	0	0,09	0,02	0,1	1,4	0,11	0,21	1,51	7,3	47,6	57,5	0,25	1	5	94
58	0 - 20	5,11	3,01	-2,1	0,6	33	0,13	0,17	0,78	6,1	0,38	1,16	6,48	5,9	67,2	56,5	5,07	5	10	85
	80 - 100	5,2	3,27	-1,93	0,7	4	0,08	0,04	0,39	2,1	0,13	0,52	2,23	5,8	75	53,9	1,27	1	11	88
Média		4,59	3,21	-1,38	9,8	31	0,36	0,25	1,0	9,2	0,69	1,71	9,93	7,6	62,9	53,6	4,73	8	7	85
Máximo		5,11	4,02	-0,80	28,4	53	1,21	0,75	2,3	21,9	2,10	2,76	22,32	18,9	84,8	59,9	7,68	20	12	95
Mínimo	0 - 20	3,89	2,49	-2,10	0,6	18	0,12	0,07	0,5	4,2	0,27	0,86	4,47	1,9	18,9	33,0	1,77	2	2	68
Percentil 75		4,82	3,37	-1,20	10,5	33	0,19	0,18	0,9	9,0	0,42	2,59	11,10	6,0	75,2	59,3	6,97	8	10	90
Percentil 50		4,77	3,15	-1,40	7,0	30	0,15	0,17	0,8	6,1	0,38	1,17	6,48	5,9	68,6	59,1	5,07	5	9	86
Percentil 25		4,35	3,01	-1,40	2,3	19	0,13	0,09	0,6	5,0	0,29	1,16	5,29	5,5	67,2	56,6	2,17	5	3	85
Média		4,77	3,49	-1,28	1,1	2	0,11	0,04	0,5	2,4	0,16	0,61	2,60	6,2	66,9	54,0	0,76	5	8	87
Máximo		5,20	4,09	-0,70	1,4	4	0,18	0,06	1,0	3,7	0,25	1,12	3,95	7,3	87,5	59,9	1,27	19	14	94
Mínimo	80 - 100	4,59	3,24	-1,93	0,7	0	0,08	0,02	0,1	1,4	0,11	0,21	1,51	5,1	47,6	41,8	0,25	1	4	67
Percentil 75		4,79	3,46	-1,13	1,2	4	0,12	0,04	0,6	2,6	0,17	0,84	2,74	6,6	75,0	57,5	1,14	3	11	93
Percentil 50		4,67	3,38	-1,29	1,1	2	0,09	0,04	0,4	2,4	0,14	0,52	2,57	6,3	70,2	56,8	0,64	2	5	93
Percentil 25		4,61	3,27	-1,37	1,0	2	0,09	0,04	0,2	2,1	0,13	0,37	2,23	5,8	54,1	53,9	0,51	1	5	88

Tabela 7 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras dos Gleissolos estudados.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	P -- mg dm ⁻³ --	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	SB	CTC	CTCt	V ---- % ----	m	P-Rem mg L ⁻¹	MO	Argila	Silte	Areia ----- dag kg ⁻¹ -----
GLEISSOLOS																				
59	0 – 20	4,97	3,73	-1,24	18,4	46	7,29	2,85	2,83	7,9	10,26	13,09	18,16	56,5	21,6	16	2,43	55	44	1
	80 – 100	6,72	4,4	-2,32	12,9	30	7,95	7,03	0	2,3	15,06	15,06	17,36	86,8	0	35	0,51	39	58	3
60	0 – 20	4,4	4,21	-0,19	1,4	9	0,04	0,03	8,2	9	0,09	8,29	9,09	1	98,9	9,3	5,12	51	46	3
	80 – 100	5,35	3,81	-1,54	0,3	16	0,05	0,93	3,61	13,7	1,02	4,63	14,72	6,9	78	9,8	0,38	73	23	4
61	0 – 20	4,3	4	-0,3	5,3	45	0,32	0,61	5,95	9	1,05	7	10,05	10,4	85	16,6	2,94	41	53	6
	80 – 100	4,84	3,88	-0,96	0,6	19	0,11	0,51	4	9	0,67	4,67	9,67	6,9	85,7	11,3	0,13	46	46	8
62	0 – 20	4,41	3,76	-0,65	16,6	39	1,28	1,35	4,2	7,7	2,73	6,93	10,43	26,2	60,6	11,9	1,66	29	69	2
	80 – 100	5,01	3,72	-1,29	5,7	49	1,6	3,59	6,73	9,3	5,32	12,05	14,62	36,4	55,9	9,2	1,02	55	44	1
63	0 – 20	5,15	3,89	-1,26	32,6	53	1,59	1,8	1,95	8,7	3,53	5,48	12,23	28,9	35,6	13,3	4,94	37	61	2
	80 – 100	4,84	3,8	-1,04	15,3	70	2,54	0,96	2,34	9,3	3,68	6,02	12,98	28,4	38,9	11,9	4,31	71	27	2
Média		4,65	3,92	-0,73	14,9	38	2,10	1,33	4,6	8,5	3,53	8,16	11,99	24,6	60,3	13,4	3,42	43	55	3
Máximo		5,15	4,21	-0,19	32,6	53	7,29	2,85	8,2	9,0	10,26	13,09	18,16	56,5	98,9	16,6	5,12	55	69	6
Mínimo	0 – 20	4,30	3,73	-1,26	1,4	9	0,04	0,03	2,0	7,7	0,09	5,48	9,09	1,0	21,6	9,3	1,66	29	44	1
Percentil 75		4,97	4,00	-0,30	18,4	46	1,59	1,80	6,0	9,0	3,53	8,29	12,23	28,9	85,0	16,0	4,94	51	61	3
Percentil 50		4,41	3,89	-0,65	16,6	45	1,28	1,35	4,2	8,7	2,73	7,00	10,43	26,2	60,6	13,3	2,94	41	53	2
Percentil 25		4,40	3,76	-1,24	5,3	39	0,32	0,61	2,8	7,9	1,05	6,93	10,05	10,4	35,6	11,9	2,43	37	46	2
Média		5,35	3,92	-1,43	7,0	37	2,45	2,60	3,3	8,7	5,15	8,49	13,87	33,1	51,7	15,4	1,27	57	40	4
Máximo		6,72	4,40	-0,96	15,3	70	7,95	7,03	6,7	13,7	15,06	15,06	17,36	86,8	85,7	35,0	4,31	73	58	8
Mínimo	80 – 100	4,84	3,72	-2,32	0,3	16	0,05	0,51	0,0	2,3	0,67	4,63	9,67	6,9	0,0	9,2	0,13	39	23	1
Percentil 75		5,35	3,88	-1,04	12,9	49	2,54	3,59	4,0	9,3	5,32	12,05	14,72	36,4	78,0	11,9	1,02	71	46	4
Percentil 50		5,01	3,81	-1,29	5,7	30	1,60	0,96	3,6	9,3	3,68	6,02	14,62	28,4	55,9	11,3	0,51	55	44	3
Percentil 25		4,84	3,80	-1,54	0,6	19	0,11	0,93	2,3	9,0	1,02	4,67	12,98	6,9	38,9	9,8	0,38	46	27	2

Tabela 8 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras dos Plintossolos estudados.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia
					-- mg dm ⁻³ --					cmol _c dm ⁻³				----	%	mg L ⁻¹		----- dag kg ⁻¹ -----		
PLINTOSSOLOS																				
64	0 - 20	4,59	4,14	-0,45	3,3	20	0,21	0,13	1,85	8,7	0,39	2,24	9,09	4,3	82,6	24,1	3,2	40	5	55
	80 - 100	4,66	4,16	-0,5	0,4	1	0,06	0,02	1,56	3,4	0,08	1,64	3,48	2,3	95,1	23,9	0,64	56	4	40
65	0 - 20	5,1	4,01	-1,09	0,7	43	0,01	0,1	2,24	7,4	0,22	2,46	7,62	2,9	91,1	24,8	3,52	19	4	77
66	0 - 20	4,11	4,13	0,02	1,6	61	0,09	0,13	1,37	5,8	0,38	1,75	6,18	6,1	78,3	23,1	2,03	26	14	60
	80 - 100	5	4,82	-0,18	0,3	12	0,11	0,03	0,1	2,9	0,17	0,27	3,07	5,5	37	6	0,89	35	15	50
67	0 - 20	4,23	4,05	-0,18	1,4	24	0,12	0,12	1,66	5,6	0,3	1,96	5,9	5,1	84,7	23,4	2,03	22	17	61
	80 - 100	4,92	4,56	-0,36	0,3	7	0,06	0,04	0,59	3,7	0,12	0,71	3,82	3,1	83,1	3,8	0,63	32	17	51
Média		4,51	4,08	-0,43	1,8	37	0,11	0,12	1,8	6,9	0,32	2,10	7,20	4,6	84,2	23,9	2,70	27	10	63
Máximo		5,10	4,14	0,02	3,3	61	0,21	0,13	2,2	8,7	0,39	2,46	9,09	6,1	91,1	24,8	3,52	40	17	77
Mínimo	0 - 20	4,11	4,01	-1,09	0,7	20	0,01	0,10	1,4	5,6	0,22	1,75	5,90	2,9	78,3	23,1	2,03	19	4	55
Percentil 75		4,85	4,14	-0,08	2,5	52	0,17	0,13	2,0	8,1	0,39	2,35	8,36	5,6	87,9	24,45,0	3,36	33	16	69
Percentil 50		4,41	4,09	-0,32	1,5	34	0,11	0,13	1,8	6,6	0,34	2,10	6,90	4,7	83,7	23,8	2,62	24	10	61
Percentil 25		4,17	4,03	-0,77	1,1	22	0,05	0,11	1,5	5,7	0,26	1,86	6,04	3,6	80,5	23,3	2,03	21	5	58
Média		4,86	4,51	-0,35	0,3	7	0,08	0,03	0,8	3,3	0,12	0,87	3,46	3,6	71,7	11,2	0,72	41	12	47
Máximo		5,00	4,82	-0,18	0,4	12	0,11	0,04	1,6	3,7	0,17	1,64	3,82	5,5	95,1	23,9	0,89	56	17	51
Mínimo	80 - 100	4,66	4,16	-0,50	0,3	1	0,06	0,02	0,1	2,9	0,08	0,27	3,07	2,3	37,0	3,8	0,63	32	4	40
Percentil 75		5,00	4,82	-0,18	0,4	12	0,11	0,04	1,6	3,7	0,17	1,64	3,82	5,5	95,1	23,9	0,89	56	17	51
Percentil 50		4,92	4,56	-0,36	0,3	7	0,06	0,03	0,6	3,4	0,12	0,71	3,48	3,1	83,1	6,0	0,64	35	15	50
Percentil 25		4,66	4,16	-0,50	0,3	1	0,06	0,02	0,1	2,9	0,08	0,27	3,07	2,3	37,0	3,8	0,63	32	4	40

Tabela 9 - Resultados das análises químicas e físicas das amostras de Terra Preta do Índio estudadas.

Amostra	Prof. cm	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	CTC	CTCt	V	m	P-Rem	MO	Argila	Silte	Areia
					-- mg dm ⁻³ --	----- cmol _c dm ⁻³ -----					----- % -----		mg L ⁻¹	----- dag kg ⁻¹ -----						
TERRAS PRETAS DE ÍNDIO																				
68	0 - 20	5,63	4,97	-0,66	14,2	29	8,49	1,01	0	7,6	9,57	9,57	17,17	55,7	0	32,8	5,63	48	4	48
	80 - 100	5,18	4,48	-0,7	0,1	5	2,34	0,18	0,29	5,5	2,53	2,82	8,03	31,5	10,3	30,9	1,15	72	1	27
69	0 - 20	6,47	5,98	-0,49	28,6	91	13,56	2,13	0	3,7	15,92	15,92	19,62	81,1	0	11,3	8,44	52	19	29
	80 - 100	6,09	5,78	-0,31	3	35	2,17	0,24	0	1,9	2,5	2,5	4,4	56,8	0	4,7	1,54	71	10	19
70	0 - 20	5,3	5,15	-0,15	3,4	35	3,85	0,79	0	6	4,73	4,73	10,73	44,1	0	15,6	4,73	25	5	70
	80 - 100	5,34	4,44	-0,9	1,6	35	0,47	0,04	0,49	2,7	0,6	1,09	3,3	18,2	45	24,2	0,9	33	7	60
71	0 - 20	5,34	4,66	-0,68	53,4	62	3,36	0,56	0,29	9,8	4,08	4,37	13,88	29,4	6,6	18,4	4,82	38	10	52
	80 - 100	5,03	4,8	-0,23	14,9	9	0,43	0,07	0,29	5,5	0,52	0,81	6,02	8,6	35,8	13,9	1,65	46	11	43
Média		5,69	5,19	-0,50	24,9	54	7,32	1,12	0,1	6,8	8,58	8,65	15,35	52,6	1,7	19,5	5,91	41	10	50
Máximo		6,47	5,98	-0,15	53,4	91	13,56	2,13	0,3	9,8	15,92	15,92	19,62	81,1	6,6	32,8	8,44	52	19	70
Mínimo	0 - 20	5,30	4,66	-0,68	3,4	29	3,36	0,56	0,0	3,7	4,08	4,37	10,73	29,4	0,0	11,3	4,73	25	4	29
Percentil 75		6,05	5,57		41,0	77	11,03	1,57	0,1	8,7	12,75	12,75	18,40	68,4	3,3	25,6	7,04	50	15	61
Percentil 50		5,49	5,06		21,4	49	6,17	0,90	0,0	6,8	7,15	7,15	15,53	49,9	0,0	17,0	5,23	43	8	50
Percentil 25		5,32	4,82		8,8	32	3,61	0,68	0,0	4,9	4,41	4,55	12,31	36,8	0,0	13,5	4,78	32	5	39
Média		5,41	4,88	-0,54	4,9	21	1,35	0,13	0,3	3,9	1,54	1,81	5,44	28,8	22,8	18,4	1,31	56	7	37
Máximo		6,09	5,78	-0,23	14,9	35	2,34	0,24	0,5	5,5	2,53	2,82	8,03	56,8	45,0	30,9	1,65	72	11	60
Mínimo	80 - 100	5,03	4,44	-0,90	0,1	5	0,43	0,04	0,0	1,9	0,52	0,81	3,30	8,6	0,0	4,7	0,90	33	1	19
Percentil 75		5,72	5,29	-0,27	9,0	35	2,26	0,21	0,4	5,5	2,52	2,66	7,03	44,2	40,4	27,6	1,60	72	11	52
Percentil 50		5,26	4,64	-0,51	2,3	22	1,32	0,13	0,3	4,1	1,55	1,80	5,21	24,9	23,1	19,1	1,35	59	9	35
Percentil 25		5,11	4,46	-0,80	0,9	7	0,45	0,06	0,1	2,3	0,56	0,95	3,85	13,4	5,2	9,3	1,03	40	4	23

Os dados comparativos referentes aos atributos químicos dos solos nas duas profundidades analisadas estão nas figuras 4 e 5. Os Latossolos e Argissolos apresentaram na camada superior um valor médio de pH em H₂O de 4,3, sendo esta reação considerada do tipo extremamente ácida. Já em profundidade, a reação destes solos foi do tipo fortemente ácida, com pH em H₂O médio de 4,75. As classes dos Cambissolos, Espodossolos, Gleissolos e Plintossolos apresentaram, nas duas profundidades, reações do tipo fortemente ácida, com valores médios de pH em H₂O variando entre 4,5 e 5,3. Já os Neossolos Flúvicos e as Terras Pretas de Índio apresentaram reação do tipo moderadamente ácida nas duas profundidades, com médias de pH em H₂O em superfície de 6 e 5,7, respectivamente, e em profundidade seus respectivos valores foram de 6,4 e 5,1. De maneira geral, os solos apresentam carga líquida negativa, medida pelo ΔpH, no entanto, algumas amostras da classe dos Latossolos, Argissolos e Plintossolos com carga líquida positiva.

Os maiores teores de matéria orgânica dos solos foram obtidos em superfície. Os teores mais elevados foram observados nas TPI (valores entre 4,73 e 8,44 dag kg⁻¹), que apresentaram também a maior média em superfície (5,91 dag kg⁻¹). Os Latossolos apresentaram teor médio de 4,45 dag kg⁻¹ em superfície. Já os menores teores de MOS em superfície foram observados nos Argissolos, Neossolos Flúvicos, Cambissolos, Plintossolos e Gleissolos, com valores médios de 2,95; 2,25; 2,98; 2,70 e 3,42 dag kg⁻¹, respectivamente.

A soma de bases (SB) expressa melhor os resultados para os elementos K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, que estão relacionados à fertilidade dos solos. As maiores médias para a SB foram obtidas, em superfície, nos solos de várzea (Neossolos Flúvicos: 9,9 cmol_c dm⁻³; Gleissolos: 3,5 cmol_c dm⁻³) e nas Terras Pretas de Índio (8,6 cmol_c dm⁻³). Os Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Espodossolos e Plintossolos apresentaram valores médios em superfície de 0,4; 1,1; 2,0; 0,7 e 0,3 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

A capacidade de troca de cátions efetiva (CTC) e a determinada em pH 7 (CTCt) seguiu o mesmo comportamento da SB, com os Neossolos Flúvicos, Gleissolos e as Terras Pretas de Índio apresentando as maiores médias em superfície (10,15; 8,16 e 8,65 cmol_c dm⁻³, respectivamente). Na profundidade de 80 – 100 cm, as maiores médias foram observadas nos Neossolos Flúvicos e nos Gleissolos, com médias de 11,20 e 8,49 cmol_c dm⁻³, respectivamente. Os Latossolos, Argissolos, Espodossolos e Plintossolos apresentaram valores médios inferiores a 3,5 cmol_c dm⁻³ para as duas profundidades.

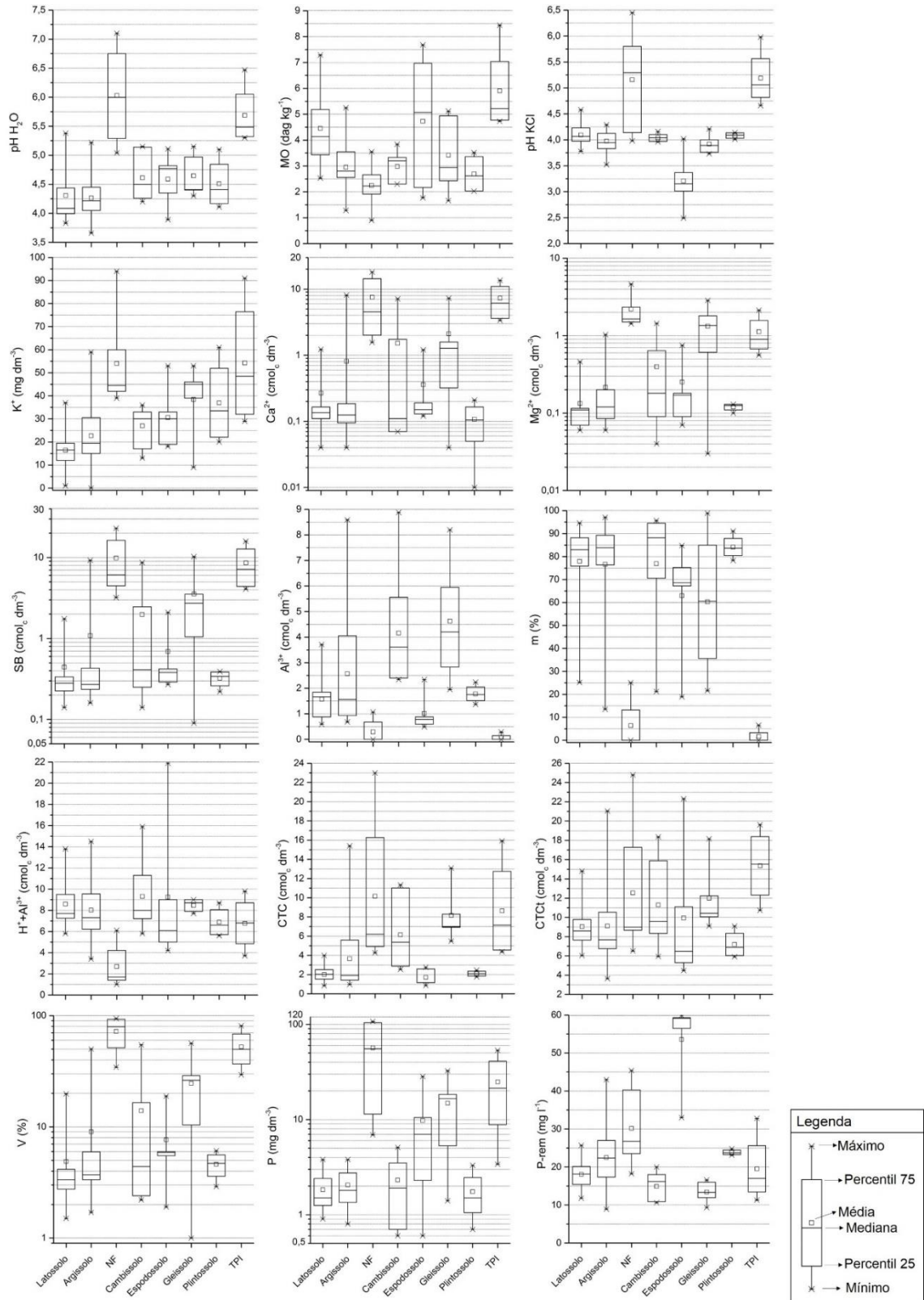


Figura 4 – Principais atributos químicos dos solos estudados na profundidade de 0 – 20 cm.

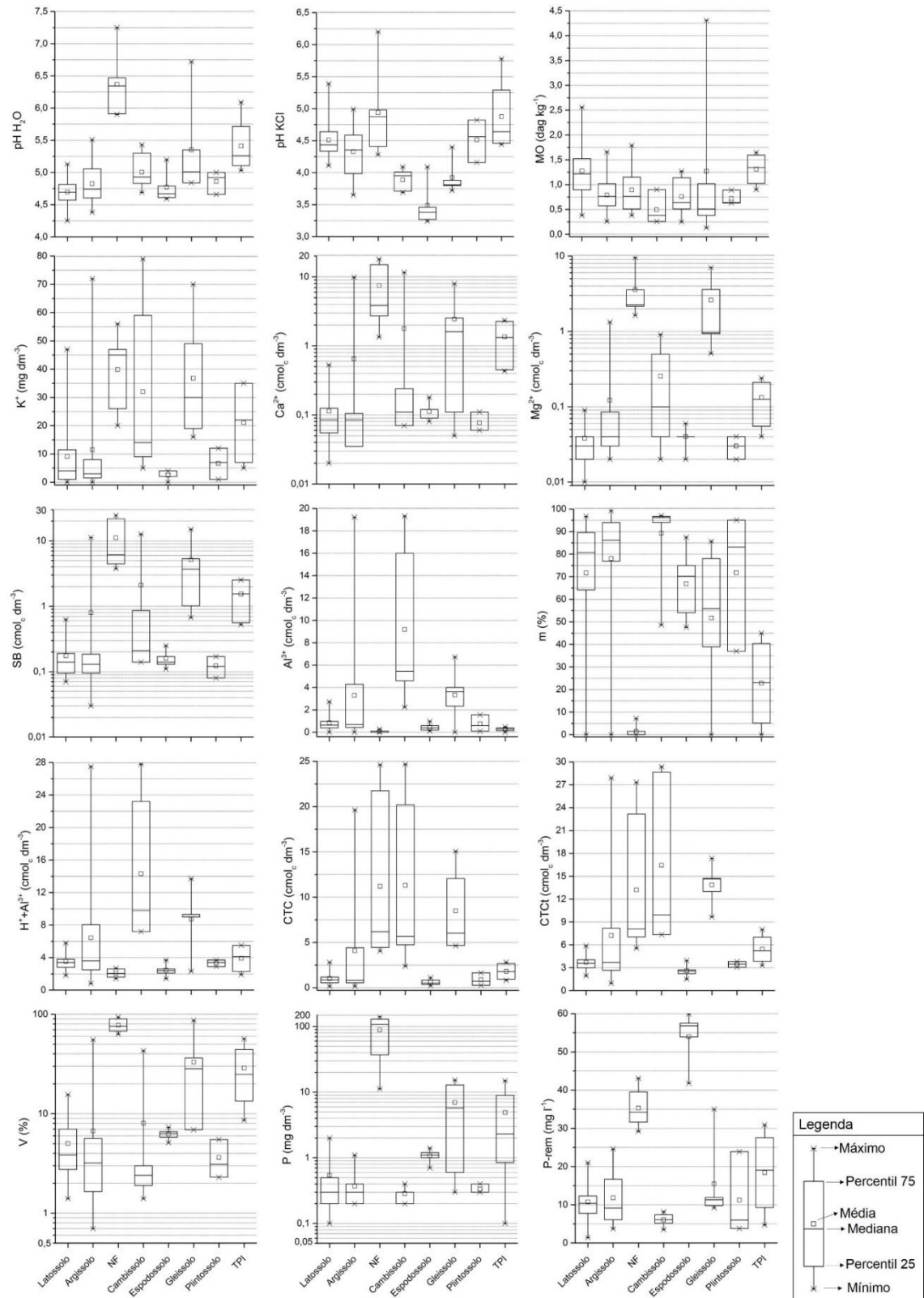


Figura 5 – Principais atributos químicos dos solos estudados na profundidade de 80 – 100 cm.

Dentre os solos avaliados, os Cambissolos apresentaram os teores médios de alumínio trocável (Al³⁺) mais elevados, com médias de 4,2 e 9,2 cmol_c dm⁻³ nas

profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente. Já os Argissolos apresentaram teores médios da ordem de 2,6 e 3,3 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para superfície e subsuperfície, respectivamente. Estas duas classes também apresentaram amostras com valores de Al^{3+} superiores a 15 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em profundidade. Os menores valores para Al^{3+} foram observados nos Neossolos Flúvicos e nas Terras Pretas de Índio.

As camadas superficiais dos solos apresentaram os maiores valores para a acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), com valores médios variando entre 6,8 e 9,3 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para todos os solos, com exceção dos Neossolos Flúvicos, que apresentaram um valor médio de 2,6 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Em subsuperfície, as maiores médias foram obtidas nos Cambissolos (14,3 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Gleissolos (8,7 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Argissolos (6,4 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto os demais solos apresentaram valores médios menores que 3,9 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Os Neossolos Flúvicos apresentaram, para as duas profundidades, as maiores médias de fósforo (P) (57 e 89 mg dm^{-3} para 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente). Em superfície, as TPI (24,90 mg dm^{-3}), Gleissolos (14,86 mg dm^{-3}) e Espodossolos (9,76 mg dm^{-3}) também apresentaram médias elevadas. Já em subsuperfície, os Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Espodossolos, Plintossolos e as TPI apresentaram valores médios de P menores que 5 mg dm^{-3} .

Os Espodossolos apresentaram os maiores valores médios de fósforo remanescente (P-rem) para as duas profundidades (53 mg L^{-1}). Já os Neossolos Flúvicos apresentaram teor médio de P-rem de 32 mg L^{-1} nas duas camadas. Para os demais solos, os valores médios obtidos foram inferiores a 24 mg L^{-1} na camada superficial e a 18 mg L^{-1} em subsuperfície.

2.3.2 Análise multivariada dos atributos químicos e físicos dos solos

Os resultados para a extração dos autovalores para a determinação das componentes principais são apresentados na tabela 10. Observa-se que, para ambas as profundidades, somente quatro (4) componentes principais apresentaram autovalores maiores que 1, sendo estas componentes responsáveis por explicar 82,27% e 83,28 % das variâncias dos dados na profundidade de 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente. O resultado para a carga fatorial de cada variável em relação as 4 componentes principais após rotação pelo método Varimax para ambas as profundidades encontra-se na tabela 11. As cargas fatoriais de cada variável e os escores fatoriais de cada observação (amostras de solos) para as duas primeiras componentes são exibidos nas figuras 6 e 7.

Tabela 10 - Resultados dos autovalores para a extração das componentes principais e variância total explicada pelas componentes para a profundidade de 0 – 20 e 80 – 100 cm dos solos do estado do Amazonas.

0 - 20 cm						
Componentes	----- Autovalores iniciais -----			Autovalores após rotação Varimax		
	Total	% de Variância	Cumulativa	Total	% de Variância	Cumulativa
1	6,546	40,913	40,913	5,346	33,415	33,415
2	3,556	22,227	63,14	3,074	19,213	52,628
3	1,571	9,822	72,961	2,899	18,120	70,748
4	1,49	9,312	82,273	1,844	11,525	82,273
5	0,745	4,659	86,932			
6	0,557	3,481	90,414			
7	0,377	2,354	92,768			
8	0,332	2,075	94,843			
9	0,282	1,759	96,602			
10	0,198	1,238	97,841			
11	0,099	0,62	98,461			
12	0,091	0,571	99,032			
13	0,059	0,367	99,399			
14	0,056	0,351	99,751			
15	0,027	0,166	99,917			
16	0,013	0,083	100			

80 - 100 cm						
Componentes	----- Autovalores iniciais -----			Autovalores após rotação Varimax		
	Total	% de Variância	Cumulativa	Total	% de Variância	Cumulativa
1	5,782	36,137	36,137	5,701	35,629	35,629
2	4,34	27,125	63,261	3,659	22,869	58,498
3	2,074	12,962	76,223	2,639	16,491	74,989
4	1,13	7,061	83,284	1,327	8,295	83,284
5	0,721	4,505	87,789			
6	0,43	2,69	90,479			
7	0,347	2,167	92,646			
8	0,309	1,929	94,575			
9	0,251	1,566	96,141			
10	0,167	1,044	97,185			
11	0,138	0,86	98,045			
12	0,11	0,685	98,73			
13	0,083	0,517	99,247			
14	0,067	0,421	99,668			
15	0,03	0,191	99,859			
16	0,023	0,141	100			

Tabela 11 - Resultado da matriz das cargas fatoriais para as 4 primeiras componentes após rotação pelo método Varimax.

Variáveis	0 - 20 cm				80 - 100 cm			
	----- Componentes -----				----- Componentes -----			
	1	2	3	4	1	2	3	4
pH H ₂ O	0,48	-0,002	0,653	-0,162	0,736	-0,442	-0,131	-0,242
pH KCl	0,166	0,239	0,856	0,029	0,029	-0,8	0,292	0,159
P	0,829	0,02	-0,001	0,001	0,6	0,012	-0,44	0,485
K ⁺	0,731	0,117	0,161	-0,193	0,822	0,28	0,252	0,086
Ca ²⁺	0,868	0,104	0,265	0,11	0,885	-0,198	-0,116	0,101
Mg ²⁺	0,927	0,151	0,11	0,006	0,911	-0,024	0,005	-0,092
Al ³⁺	-0,298	0,577	-0,709	-0,14	0,046	0,893	0,332	-0,158
H ⁺ +Al ³⁺	-0,108	0,187	-0,826	0,438	0,174	0,823	0,365	-0,063
CTC	0,662	0,594	-0,07	-0,066	0,746	0,533	0,13	-0,043
V%	0,848	0,027	0,385	-0,123	0,715	-0,503	-0,198	0,048
M	-0,836	0,11	-0,481	-0,056	-0,573	0,741	0,186	-0,014
MO	0,053	0,017	-0,211	0,848	-0,154	-0,27	0,121	0,867
P-Rem	0,1	-0,859	0,072	-0,273	0,036	-0,206	-0,87	0,172
Argila	-0,183	0,538	0,077	0,743	-0,083	0,09	0,902	0,255
Silte	0,427	0,718	0,048	-0,362	0,777	0,089	-0,048	-0,268
Areia	-0,258	-0,832	-0,051	-0,237	-0,666	-0,115	-0,586	-0,177

As variáveis que apresentaram cargas fatoriais maior que 0,7 estão destacadas na matriz fatorial.

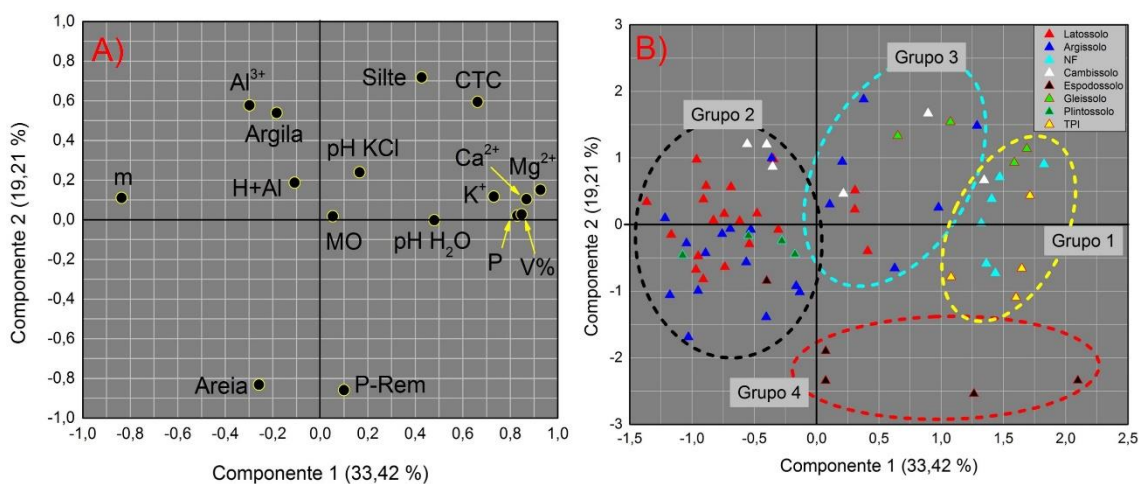


Figura 6 – Distribuição das cargas fatoriais para as variáveis químicas e físicas das duas primeiras componentes principais extraídas com método Varimax (A), e distribuição dos escores de cada observação (amostra de solo) (B), da camada superficial (0 – 20 cm) de solos dos estado do Amazonas.

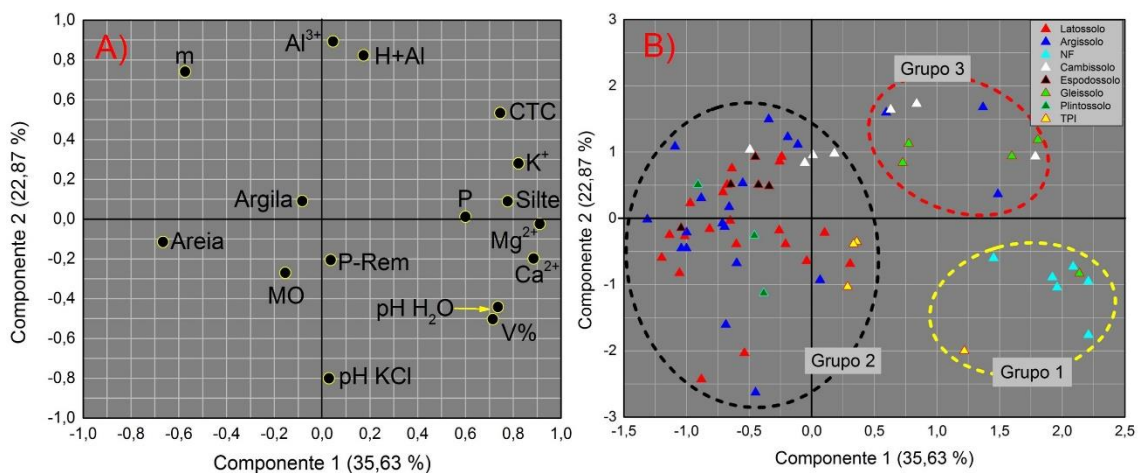


Figura 7 – Distribuição das cargas fatoriais para as variáveis químicas e físicas das duas primeiras componentes principais extraídas com método Varimax (A), e distribuição dos escores de cada observação (amostra de solo) (B), da camada subsuperficial (80 – 100 cm) de solos dos estado do Amazonas.

Na profundidade de 0 – 20 cm, as variáveis P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , V% têm carga fatorial positiva e $> 0,7$ na componente 1 e, de forma geral, estas variáveis estão relacionadas com a fertilidade química dos solos. De maneira oposta, se comporta a variável m (percentagem de saturação por alumínio), com carga fatorial negativa de 0,7. A componente 2 apresenta a variável silte com carga positiva (0,718) e as variáveis areia (- 0,832) e P-Rem (- 0,859) com carga negativa.

Na profundidade de 80 – 100 cm, as variáveis pH H_2O , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CTC, V e silte apresentam carga fatorial positiva e $> 0,7$ para a componente 1, parâmetros esses ligados de maneira geral à fertilidade química dos solos. Na componente 2, as variáveis Al^{3+} , m e $H^+ + Al^{3+}$ apresentam carga fatorial positiva e $> 0,7$, carga esta oposta à da variável pH KCl (- 0,82).

Ao se avaliar a distribuição dos escores relacionados as amostras de solos na para a profundidade de 0 – 20 cm, observa-se a formação de 4 grupos. O primeiro grupo têm as Terras Pretas de Índio, Neossolos Flúvicos, duas amostras dos Gleissolos e uma amostra de Cambissolo que estão distribuídos mais à direita na direção do 1º quadrante (Figura 6B), estando assim distribuídos no mesmo quadrante que as variáveis associadas à fertilidade dos solos (Figura 6A). Os Latossolos, Plintossolos e parte dos Argissolos e uma amostra de Espodossolo estão distribuídos nos quadrantes 2 e 3, constituindo assim o grupo 2 (Figura 6B), e estão distribuídos na direção oposta das variáveis relacionadas com a fertilidade dos solos. O grupo 3 é formado por algumas amostras de Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos e de maneira geral são solos que apresentam como

material de origem os sedimentos da Formação Solimões. O grupo 4 é formado por amostras de Espodosolos e estão distribuídos na mesma posição que as variáveis relacionadas ao teor de areia e ao fósforo remanescente (P-Rem).

Na profundidade de 80 – 100 cm, observa-se a formação de 3 grupos, no qual o grupo 1 é formado por todas as amostras dos Neossolos Flúvicos, uma amostra de Gleissolo e uma única amostra de Terra Preta do Índio (Figura 7B), sendo que tais amostras se diferenciam das demais amostras de solos e também estão na direção das variáveis químicas relacionadas a fertilidade dos solos, como Ca^{2+} e Mg^{2+} (Figura 7A).

O grupo 2, na profundidade de 80 – 100 cm é formado por todas as amostras dos Latossolos, Plintossolos, Espodosolos e por algumas amostras dos Argissolos, Cambissolos e das Terras Pretas de Índio. Este grupo apresenta suas amostras distribuídas nos quadrantes 2 e 3 e de certa forma, encontra-se na direção oposta do grupo 1. O grupo 3 é formado por algumas amostras de Cambissolos, Argissolos e Gleissolos e estão distribuídos na direção das variáveis Al^{3+} e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, como observado na figura 7A.

2.3.3 Caracterização química relacionada à mineralogia dos solos

Os resultados da caracterização química relacionada a mineralogia para cada amostra dos Latossolos, Argissolos, Neossolos Flúvicos, Cambissolos, Espodosolos, Gleissolos, Plintossolos e das Terras Pretas de Índio estão apresentados nas tabelas 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19, respectivamente. Os resultados comparativos entre as classes de solos encontram-se nas figuras 8 e 9 para as profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente, por meio de gráfico do tipo *box plot*.

Os maiores teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO e TiO_2 foram encontrados em subsuperfície, acompanhados dos teores de argila, que tendem a ser maiores em profundidade.

Os Gleissolos apresentaram os maiores teores de SiO_2 nas duas profundidades, com valores médios de 195 e 211 g kg^{-1} em superfície e subsuperfície, respectivamente. Já os Latossolos apresentaram, para as duas profundidades, valor médio de 186 g kg^{-1} de SiO_2 , enquanto os Neossolos Flúvicos apresentaram uma média de 150 g kg^{-1} . Valores médios entre 76 e 106 g kg^{-1} foram observados, nas duas profundidades, nos Plintossolos e nas Terras Pretas de Índio. Os menores teores de SiO_2 foram observados nos Espodosolos, que apresentaram médias de 19,30 g kg^{-1} em superfície e 12,31 g kg^{-1} em subsuperfície.

Tabela 12 – Resultados de atributos químicos relacionados à mineralogia dos Latossolos estudados.

Amostra	Prof. cm	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fe _d	Fe _o	Al _d	Al _o	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _{AS}	cmol mol ⁻¹		
													SI	Ki	Kr
LATOSSOLOS															
1	0 – 20	46,21	295,13	322,27	0,19	13,63	23,82	1,18	5,23	1,78	0,05	0,74	23,98	1,86	0,94
	80 – 100	44,45	318,69	303,88	0,22	24,84	20,72	0,80	6,84	1,09	0,04	0,67	37,41	1,62	0,84
2	0 – 20	23,22	253,04	244,53	0,04	9,87	17,17	1,64	4,52	1,98	0,10	1,06	25,30	1,64	0,89
	80 – 100	25,73	308,65	250,08	0,10	21,59	16,80	0,39	7,87	2,44	0,02	0,93	40,66	1,38	0,75
3	0 – 20	85,85	303,94	325,68	0,32	9,87	25,57	0,87	6,38	1,84	0,03	0,43	27,57	1,82	0,84
	80 - 100	84,24	336,61	334,03	0,24	20,41	21,67	0,32	9,59	2,51	0,01	0,37	40,71	1,69	0,79
4	0 – 20	49,99	297,36	306,45	0,15	8,32	23,34	1,19	5,07	1,97	0,05	0,67	22,47	1,75	0,88
	80 - 100	50,20	334,11	300,07	0,10	17,54	18,85	0,37	9,10	2,48	0,02	0,54	42,58	1,53	0,78
5	0 – 20	30,28	244,09	301,42	0,14	8,32	17,56	1,29	4,63	2,01	0,07	0,83	25,00	2,10	1,10
	80 - 100	31,81	303,72	302,73	0,12	19,63	11,69	0,26	9,08	3,73	0,02	0,53	49,21	1,69	0,90
6	0 – 20	38,63	288,84	342,99	0,08	10,66	16,80	1,34	3,91	1,57	0,08	0,62	23,86	2,02	1,05
	80 - 100	37,08	309,59	318,00	0,08	20,37	12,39	0,54	5,61	1,49	0,04	0,48	41,85	1,75	0,92
7	0 – 20	11,38	80,90	98,56	0,15	4,39	16,05	2,23	5,06	4,00	0,14	2,02	13,70	2,07	1,07
	80 - 100	13,92	120,83	145,87	0,12	13,05	11,73	3,37	4,24	2,19	0,29	1,21	33,67	2,05	1,08
8	0 – 20	199,73	228,56	187,70	1,82	23,49	76,75	3,24	12,64	5,69	0,04	0,55	16,37	1,40	0,44
	80 - 100	265,30	260,82	175,36	1,24	38,62	63,10	1,83	13,20	2,03	0,03	0,34	27,40	1,14	0,33
9	0 – 20	91,14	220,05	245,07	0,12	3,79	62,13	2,73	10,16	1,91	0,04	0,97	22,33	1,89	0,79
	80 - 100	93,42	243,67	217,79	0,16	9,58	47,40	0,75	10,77	0,56	0,02	0,73	31,18	1,52	0,65
10	0 – 20	92,31	172,61	195,40	0,22	4,55	53,73	2,19	11,39	3,05	0,04	0,83	25,09	1,92	0,74
	80 - 100	67,49	213,42	202,70	0,20	9,15	45,54	1,76	12,87	1,74	0,04	0,96	34,48	1,61	0,72
11	0 – 20	143,48	330,45	112,16	0,07	5,26	46,05	1,88	11,30	4,74	0,04	0,46	23,52	0,58	0,24
	80 - 100	212,19	345,55	94,34	0,05	7,60	48,51	0,66	13,88	1,59	0,01	0,33	34,72	0,46	0,17
12	0 – 20	108,47	300,97	304,36	0,05	2,92	48,43	2,26	10,03	2,56	0,05	0,64	25,09	1,72	0,74
	80 - 100	122,97	307,72	268,95	0,05	5,09	56,33	1,76	13,99	1,61	0,03	0,66	31,96	1,49	0,62
13	0 – 20	176,13	203,98	228,74	1,75	10,42	134,55	5,23	12,38	3,91	0,04	1,09	11,94	1,91	0,60
	80 - 100	228,44	241,80	230,36	1,17	16,52	112,85	5,69	16,30	1,69	0,05	0,71	22,02	1,62	0,49
14	0 – 20	35,62	104,43	58,78	0,04	4,51	65,02	4,49	11,82	4,05	0,07	2,61	21,00	0,96	0,42
	80 - 100	40,74	145,69	51,54	0,06	13,55	60,42	1,68	16,36	1,28	0,03	2,12	34,71	0,60	0,28
15	0 – 20	91,89	142,99	79,27	0,10	6,24	69,11	3,13	13,32	3,40	0,05	1,08	23,74	0,94	0,34
	80 - 100	101,35	174,55	72,90	0,10	17,25	70,84	3,17	23,81	2,62	0,04	1,00	39,33	0,71	0,26

Continua...

Tabela 12 – Continuação...

Amostra	Prof.	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fed	Feo	Ald	Alo	Feo/Fed	Fed/FeAS	SI	Ki	Kr
	cm	g kg ⁻¹										cmol mol ⁻¹			
LATOSSOLOS															
16	0 – 20	39,83	114,88	87,64	0,05	2,92	60,57	4,01	12,13	3,56	0,07	2,17	23,88	1,30	0,57
	80 - 100	46,61	151,96	82,05	0,02	7,02	55,79	1,91	21,52	3,42	0,03	1,71	41,02	0,92	0,41
17	0 – 20	78,35	222,02	226,19	0,06	2,42	47,72	2,66	9,39	2,42	0,06	0,87	24,26	1,73	0,75
	80 - 100	78,19	233,20	168,33	0,03	4,38	51,28	1,79	17,85	2,14	0,03	0,94	39,66	1,23	0,54
18	0 – 20	11,99	63,11	49,76	0,03	1,82	44,20	6,32	8,70	3,60	0,14	5,27	21,80	1,34	0,66
	80 - 100	12,81	87,99	42,71	0,02	6,02	32,19	3,19	13,73	3,28	0,10	3,59	42,73	0,83	0,42
19	0 – 20	27,24	117,21	69,37	0,04	3,48	58,63	4,26	10,04	3,53	0,07	3,08	19,87	1,01	0,48
	80 - 100	30,39	154,69	51,14	0,03	9,46	44,25	1,21	11,57	2,19	0,03	2,08	31,09	0,56	0,28
20	0 – 20	62,95	135,36	41,74	0,14	2,88	86,62	2,06	17,08	4,14	0,02	1,97	24,06	0,52	0,21
	80 - 100	83,60	200,95	38,65	0,12	8,53	72,53	1,19	25,37	2,31	0,02	1,24	40,09	0,33	0,14
Média		72,23	206,00	191,40	0,28	6,99	49,69	2,71	9,26	3,09	0,06	1,40	22,24	1,52	0,69
Máximo		199,73	330,45	342,99	1,82	23,49	134,55	6,32	17,08	5,69	0,14	5,27	27,57	2,10	1,10
Mínimo	0 – 20	11,38	63,11	41,74	0,03	1,82	16,05	0,87	3,91	1,57	0,02	0,43	11,94	0,52	0,21
Percentil 75		92,10	291,98	302,89	0,17	9,87	63,57	3,62	11,98	3,96	0,07	1,99	24,63	1,90	0,89
Percentil 50		56,47	221,04	210,79	0,11	4,90	48,07	2,25	10,04	3,22	0,05	0,92	23,80	1,73	0,74
Percentil 25		32,95	126,28	83,45	0,05	3,20	23,58	1,49	5,15	1,97	0,04	0,65	21,40	1,15	0,46
Média		83,55	239,71	182,57	0,21	14,51	43,74	1,63	13,18	2,12	0,05	1,06	36,82	1,24	0,57
Máximo		265,30	345,55	334,03	1,24	38,62	112,85	5,69	25,37	3,73	0,29	3,59	49,21	2,05	1,08
Mínimo	80 - 100	12,81	87,99	38,65	0,02	4,38	11,69	0,26	4,24	0,56	0,01	0,33	22,02	0,33	0,14
Percentil 75		97,39	309,12	284,51	0,18	20,00	58,37	1,87	16,33	2,50	0,04	1,22	40,86	1,62	0,79
Percentil 50		58,84	242,74	189,03	0,10	13,30	46,47	1,44	13,03	2,16	0,03	0,83	38,37	1,43	0,58
Percentil 25		34,45	166,68	77,47	0,05	8,06	19,79	0,60	9,09	1,60	0,02	0,53	32,82	0,77	0,30

Tabela 13 – Resultados de atributos químicos relacionados à mineralogia dos Argissolos estudados.

Amostra	Prof. cm	g kg ⁻¹											cmol mol ⁻¹		
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fe _d	Fe _o	Al _d	Al _o	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _{AS}	SI	Ki	Kr
ARGISSOLOS															
21	0 – 20	4,59	29,95	36,94	0,04	1,68	1,78	0,43	0,71	0,41	0,24	0,55	31,51	2,10	1,07
	80 - 100	9,35	80,07	59,67	0,11	6,71	20,43	1,23	7,76	1,78	0,06	3,12	39,20	1,27	0,67
22	0 – 20	5,67	58,43	72,37	0,06	2,29	16,92	4,74	5,31	3,46	0,28	4,27	23,92	2,11	1,13
	80 - 100	8,85	109,67	112,99	0,08	8,73	13,08	0,76	5,55	1,54	0,06	2,11	40,26	1,75	0,95
23	0 – 20	41,27	128,32	144,09	0,22	3,58	47,93	2,95	11,46	5,12	0,06	1,66	22,59	1,91	0,85
	80 - 100	97,23	166,26	147,21	0,21	10,78	45,99	1,35	12,36	1,30	0,03	0,68	33,90	1,51	0,56
24	0 – 20	59,25	200,57	198,45	0,11	3,72	55,99	1,87	10,33	2,18	0,03	1,35	23,77	1,68	0,76
	80 - 100	75,00	264,85	226,04	0,11	12,21	55,95	0,67	12,83	1,32	0,01	1,07	30,12	1,45	0,67
25	0 – 20	38,43	160,73	180,79	0,08	4,63	39,01	2,68	8,14	2,40	0,07	1,45	24,65	1,91	0,91
	80 - 100	54,16	197,57	189,82	0,09	12,22	42,21	0,98	12,82	1,10	0,02	1,11	37,05	1,63	0,75
26	0 – 20	53,52	104,60	126,07	0,17	4,19	70,65	4,66	10,98	2,14	0,07	1,89	21,71	2,05	0,80
	80 - 100	72,36	163,47	151,81	0,26	17,70	100,26	1,37	19,34	1,51	0,01	1,98	27,18	1,58	0,64
27	0 – 20	50,99	94,09	108,91	0,29	6,93	64,38	1,75	12,02	2,32	0,03	1,81	24,28	1,97	0,75
	80 - 100	62,88	142,95	156,16	0,26	18,16	77,57	0,64	16,84	1,25	0,01	1,76	29,56	1,86	0,76
28	0 – 20	22,21	64,57	80,21	0,32	4,13	32,13	3,62	8,91	3,60	0,11	2,07	27,83	2,11	0,92
	80 - 100	35,41	134,92	131,60	0,22	12,05	25,62	0,44	11,62	3,81	0,02	1,03	39,10	1,66	0,77
29	0 – 20	21,55	57,52	76,47	0,14	2,54	61,77	8,52	10,68	6,60	0,14	4,10	13,69	2,26	0,97
	80 - 100	62,92	118,22	141,31	0,13	7,17	80,04	1,59	6,61	0,96	0,02	1,82	12,98	2,03	0,78
30	0 – 20	7,98	46,16	54,39	0,16	3,52	83,81	10,81	13,57	6,40	0,13	15,02	16,90	2,00	1,00
	80 - 100	11,17	92,03	61,91	0,14	11,16	11,51	1,97	4,57	2,01	0,17	1,47	35,72	1,14	0,60
31	0 – 20	46,27	72,39	61,23	1,55	7,43	46,60	4,24	10,17	5,87	0,09	1,44	17,37	1,44	0,52
	80 - 100	78,04	215,77	107,89	0,58	11,85	38,97	0,62	10,86	2,60	0,02	0,71	30,84	0,85	0,37
32	0 – 20	101,88	119,97	123,81	1,97	11,79	101,20	3,39	10,67	2,19	0,03	1,42	15,22	1,75	0,56
	80 - 100	135,62	209,16	174,34	0,76	21,43	99,14	1,73	14,49	1,34	0,02	1,05	21,84	1,42	0,51
33	0 – 20	131,11	122,41	126,93	0,12	2,78	56,92	1,80	10,83	1,67	0,03	0,62	25,60	1,76	0,50
	80 - 100	165,31	180,74	141,40	0,11	7,88	66,54	1,38	13,09	1,00	0,02	0,58	27,75	1,33	0,41
34	0 – 20	53,94	125,57	187,65	0,18	2,06	56,07	6,84	7,12	2,87	0,12	1,49	15,16	2,54	1,05
	80 - 100	61,32	182,55	191,97	0,14	4,18	38,22	7,11	8,75	1,82	0,19	0,89	31,56	1,79	0,79
35	0 – 20	43,94	95,07	185,21	0,82	2,37	23,90	6,43	5,72	5,92	0,27	0,78	-	3,31	1,33
	80 - 100	61,11	157,80	240,82	0,10	6,18	13,56	8,15	5,02	2,32	0,60	0,32	50,82	2,59	1,10

Continua...

Tabela 13 – Continuação...

Amostra	Prof. cm	Fe2O3	Al2O3	SiO2	MnO	TiO2	Fed	Feo	Ald	Alo	Feo/Fed	Fed/FeAS	SI	Ki	Kr
g kg ⁻¹												cmol mol ⁻¹			
ARGISSOLOS															
36	0 – 20	47,23	96,34	162,86	0,37	2,29	34,67	6,34	6,29	5,04	0,18	1,05	8,37	2,87	1,13
	80 - 100	57,83	176,66	293,03	0,09	7,06	15,06	1,23	5,85	2,05	0,08	0,37	36,26	2,82	1,25
37	0 – 20	33,08	62,50	105,19	2,01	1,95	43,40	7,92	6,62	5,34	0,18	1,88	6,95	2,86	1,10
	80 - 100	68,98	142,04	222,84	0,15	5,18	28,82	0,89	5,26	1,33	0,03	0,60	22,56	2,67	1,06
38	0 – 20	11,67	32,39	35,96	0,03	1,15	64,78	4,80	9,40	2,99	0,07	7,94	18,12	1,89	0,82
	80 - 100	26,17	102,40	63,69	0,03	6,08	49,31	1,93	18,07	2,86	0,04	2,69	39,93	1,06	0,50
39	0 – 20	86,88	163,07	136,57	0,14	3,29	74,33	2,71	13,21	2,70	0,04	1,22	23,30	1,42	0,55
	80 - 100	99,43	257,78	142,61	0,12	10,09	67,41	0,67	20,73	1,56	0,01	0,97	37,29	0,94	0,40
40	0 – 20	19,65	51,01	86,17	0,22	2,63	41,86	8,39	8,99	5,00	0,20	3,05	19,80	2,87	1,22
	80 - 100	31,69	112,31	117,34	0,15	7,09	32,00	5,52	11,67	1,94	0,17	1,44	43,21	1,78	0,81
Média		44,06	94,28	114,51	0,45	3,75	50,91	4,74	9,06	3,71	0,12	2,75	20,04	2,14	0,90
Máximo		131,11	200,57	198,45	2,01	11,79	101,20	10,81	13,57	6,60	0,28	15,02	31,51	3,31	1,33
Mínimo	0 – 20	4,59	29,95	35,96	0,03	1,15	1,78	0,43	0,71	0,41	0,03	0,55	6,95	1,42	0,50
Percentil 75		53,73	123,99	153,48	0,34	4,16	64,58	6,64	10,90	5,23	0,18	2,56	24,28	2,40	1,09
Percentil 50		42,60	94,58	116,36	0,17	3,04	51,96	4,45	9,79	3,22	0,10	1,57	21,71	2,03	0,92
Percentil 25		20,60	57,97	74,42	0,12	2,29	36,84	2,69	6,87	2,25	0,05	1,29	15,22	1,82	0,76
Média		63,74	160,36	153,72	0,19	10,20	46,08	2,01	11,20	1,77	0,08	1,29	33,36	1,66	0,72
Máximo		165,31	264,85	293,03	0,76	21,43	100,26	8,15	20,73	3,81	0,60	3,12	50,82	2,82	1,25
Mínimo	80 - 100	8,85	80,07	59,67	0,03	4,18	11,51	0,44	4,57	0,96	0,01	0,32	12,98	0,85	0,37
Percentil 75		76,52	190,06	190,90	0,22	12,13	66,97	1,83	13,79	2,03	0,07	1,79	39,15	1,82	0,80
Percentil 50		62,10	160,63	144,91	0,13	9,41	40,59	1,29	11,64	1,55	0,03	1,06	34,81	1,61	0,71
Percentil 25		33,55	115,26	115,17	0,10	6,88	23,02	0,72	6,23	1,31	0,02	0,70	28,65	1,30	0,53

Tabela 14 – Resultados de atributos químicos relacionados à mineralogia dos Neossolos Flúvicos estudados.

Amostra	Prof. cm	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fe _d	Fe _o	Al _d	Al _o	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _{AS}	SI	Ki	Kr
		g kg ⁻¹										cmol mol ⁻¹			
NEOSSOLOS FLÚVICOS															
41	0 - 20	39,83	57,47	97,07	0,75	1,53	34,94	11,05	6,59	7,00	0,32	1,25	-	2,87	1,00
	80 - 100	53,36	87,52	112,22	0,80	4,23	62,78	19,82	4,76	1,53	0,32	1,68	-	2,18	0,80
42	0 - 20	35,49	49,02	90,31	0,70	1,55	9,92	2,38	0,62	0,31	0,24	0,40	-	3,13	1,07
	80 - 100	49,69	84,49	98,84	0,65	3,83	42,50	10,51	3,12	0,74	0,25	1,22	-	1,99	0,74
43	0 - 20	61,50	92,23	168,66	1,63	2,68	41,66	12,48	4,84	4,22	0,30	0,97	-	3,11	1,10
	80 - 100	55,49	101,25	224,83	0,83	4,97	23,98	9,51	5,76	2,22	0,40	0,62	-	3,77	1,43
44	0 - 20	63,70	113,61	226,98	1,30	2,57	32,02	11,46	5,96	6,33	0,36	0,72	-	3,40	1,28
	80 - 100	68,79	111,56	175,64	1,59	5,68	32,01	8,39	7,34	2,57	0,26	0,67	-	2,68	0,97
45	0 - 20	46,58	81,46	156,29	0,78	2,09	34,32	11,81	6,95	7,37	0,34	1,05	-	3,26	1,22
	80 - 100	39,96	56,90	101,93	0,64	5,05	35,12	15,19	6,81	2,36	0,43	1,26	-	3,05	1,05
46	0 - 20	48,54	73,07	164,45	1,07	2,10	29,50	10,39	6,68	5,53	0,35	0,87	-	3,83	1,35
	80 - 100	60,03	103,22	177,26	1,10	6,64	17,11	5,27	4,58	1,98	0,31	0,41	-	2,92	1,09
Média		49,27	77,81	150,63	1,04	2,09	30,39	9,93	5,27	5,13	0,32	0,88	-	3,27	1,17
Máximo		63,70	113,61	226,98	1,63	2,68	41,66	12,48	6,95	7,37	0,36	1,25	-	3,83	1,35
Mínimo		35,49	49,02	90,31	0,70	1,53	9,92	2,38	0,62	0,31	0,24	0,40	-	2,87	1,00
Percentil 75	0 - 20	61,50	92,23	168,66	1,30	2,57	34,94	11,81	6,68	7,00	0,35	1,05	-	3,40	1,28
Percentil 50		47,56	77,26	160,37	0,92	2,09	33,17	11,26	6,28	5,93	0,33	0,92	-	3,20	1,16
Percentil 25		39,83	57,47	97,07	0,75	1,55	29,50	10,39	4,84	4,22	0,30	0,72	-	3,11	1,07
Média		54,55	90,82	148,45	0,94	5,07	35,58	11,45	5,40	1,90	0,33	0,98	-	2,77	1,01
Máximo		68,79	111,56	224,83	1,59	6,64	62,78	19,82	7,34	2,57	0,43	1,68	-	3,77	1,43
Mínimo		39,96	56,90	98,84	0,64	3,83	17,11	5,27	3,12	0,74	0,25	0,41	-	1,99	0,74
Percentil 75	80 - 100	60,03	103,22	177,26	1,10	5,68	42,50	15,19	6,81	2,36	0,40	1,26	-	3,05	1,09
Percentil 50		54,43	94,39	143,93	0,82	5,01	33,56	10,01	5,26	2,10	0,31	0,94	-	2,80	1,01
Percentil 25		49,69	84,49	101,93	0,65	4,23	23,98	8,39	4,58	1,53	0,26	0,62	-	2,18	0,80

Tabela 15 – Resultados de atributos químicos relacionados à mineralogia dos Cambissolos estudados.

Amostra	Prof. cm	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fe _d	Fe _o	Al _d	Al _o	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _{AS}	SI	Ki	Kr
g kg ⁻¹												cmol mol ⁻¹			
CAMBISSOLOS															
47	0 - 20	33,90	78,96	105,17	0,13	2,24	57,54	5,23	8,99	5,58	0,09	2,43	11,89	2,26	0,93
	80 - 100	66,23	149,66	181,32	0,14	7,04	55,19	1,09	4,99	1,27	0,02	1,19	12,46	2,06	0,84
48	0 - 20	37,40	75,66	105,48	0,16	2,69	68,79	8,32	10,67	4,43	0,12	2,63	17,60	2,37	0,93
	80 - 100	77,69	150,72	173,45	0,12	6,33	75,65	3,46	14,14	1,92	0,05	1,39	25,95	1,96	0,76
49	0 - 20	24,53	99,14	131,60	0,15	2,78	33,75	5,26	6,81	4,06	0,16	1,97	16,66	2,26	1,06
	80 - 100	28,66	154,77	173,06	0,09	7,40	22,17	6,33	8,48	2,88	0,29	1,11	42,26	1,90	0,94
50	0 - 20	19,69	53,22	88,01	0,12	1,77	42,43	8,78	7,14	4,44	0,21	3,08	14,25	2,81	1,21
	80 - 100	59,02	113,24	129,96	0,09	6,04	47,85	19,73	7,53	2,28	0,41	1,16	27,88	1,95	0,75
51	0 - 20	18,96	61,40	99,85	0,16	1,63	27,50	8,73	5,52	4,89	0,32	2,07	6,50	2,76	1,24
	80 - 100	38,09	163,59	242,64	0,12	6,14	5,76	1,21	4,75	2,01	0,21	0,22	55,49	2,52	1,20
52	0 - 20	35,91	75,48	137,49	1,65	2,30	34,17	8,71	6,33	6,54	0,25	1,36	-	3,10	1,23
	80 - 100	228,44	241,80	230,36	1,17	16,52	112,85	5,69	16,30	1,69	0,05	0,71	22,01	1,62	0,49
53	0 - 20	44,49	86,90	206,27	0,21	2,33	26,28	7,95	6,41	6,57	0,30	0,84	-	4,03	1,57
	80 - 100	97,02	158,81	232,83	1,69	5,03	28,71	9,66	5,77	2,35	0,34	0,42	27,10	2,49	0,91
Média		30,70	75,82	124,84	0,37	2,25	41,49	7,57	7,41	5,22	0,21	2,05	13,38	2,80	1,17
Máximo		44,49	99,14	206,27	1,65	2,78	68,79	8,78	10,67	6,57	0,32	3,08	17,60	4,03	1,57
Mínimo		18,96	53,22	88,01	0,12	1,63	26,28	5,23	5,52	4,06	0,09	0,84	6,50	2,26	0,93
Percentil 75	0 - 20	37,40	86,90	137,49	0,21	2,69	57,54	8,73	8,99	6,54	0,30	2,63	16,66	3,10	1,24
Percentil 50		33,90	75,66	105,48	0,16	2,30	34,17	8,32	6,81	4,89	0,21	2,07	14,25	2,76	1,21
Percentil 25		19,69	61,40	99,85	0,13	1,77	27,50	5,26	6,33	4,43	0,12	1,36	11,89	2,26	0,93
Média		85,02	161,80	194,80	0,49	7,79	49,74	6,74	8,85	2,06	0,20	0,89	30,45	2,07	0,84
Máximo		228,44	241,80	242,64	1,69	16,52	112,85	19,73	16,30	2,88	0,41	1,39	55,49	2,52	1,20
Mínimo		28,66	113,24	129,96	0,09	5,03	5,76	1,09	4,75	1,27	0,02	0,22	12,46	1,62	0,49
Percentil 75	80 - 100	97,02	163,59	232,83	1,17	7,40	75,65	9,66	14,1	2,4	0,34	1,19	42,26	2,49	0,94
Percentil 50		66,23	154,77	181,32	0,12	6,33	47,85	5,69	7,53	2	0,21	1,11	27,10	1,96	0,84
Percentil 25		38,09	149,66	173,06	0,09	6,04	22,17	1,21	4,99	1,7	0,05	0,42	22,01	1,90	0,75

Tabela 16 – Resultados de atributos químicos relacionados à mineralogia dos Espodosolos estudados.

Amostra	Prof. cm	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fe _d	Fe _o	Al _d	Al _o	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _{AS}	SI	Ki	Kr
g kg ⁻¹												cmol mol ⁻¹			
ESPODOSSOLOS															
54	0 - 20	0,51	2,72	13,37	0,01	0,64	0,00	0,01	0,05	0,05	0,00	-	-	-	-
	80 - 100	0,20	0,17	0,21	0,11	2,68	0,19	0,02	0,00	0,01	0,11	-	-	-	-
55	0 - 20	3,08	55,56	63,86	0,21	3,85	2,35	1,05	3,70	4,31	0,45	-	-	-	-
	80 - 100	2,79	58,52	57,84	0,10	6,56	1,76	0,88	1,98	1,11	0,50	-	-	-	-
56	0 - 20	1,67	2,29	6,98	0,07	1,41	0,12	0,04	0,14	0,07	0,33	-	-	-	-
	80 - 100	1,30	2,01	0,00	0,04	4,20	0,01	0,01	0,17	0,06	1,00	-	-	-	-
57	0 - 20	0,91	1,88	7,49	0,03	0,68	0,00	0,02	0,07	0,02	0,00	-	-	-	-
	80 - 100	1,71	1,64	3,00	0,06	2,33	0,06	0,02	0,02	0,05	0,33	-	-	-	-
58	0 - 20	0,08	0,79	4,78	0,01	0,15	0,00	0,00	0,10	0,01	0,00	-	-	-	-
	80 - 100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	0,01	0,05	0,00	0,00	5,00	-	-	-	-
Média		1,25	12,65	19,30	0,07	1,35	0,49	0,22	0,81	0,89	0,16	-	-	-	-
Máximo		3,08	55,56	63,86	0,21	3,85	2,35	1,05	3,70	4,31	0,45	-	-	-	-
Mínimo	0 - 20	0,08	0,79	4,78	0,01	0,15	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	-	-	-	-
Percentil 75		1,67	2,72	13,37	0,07	1,41	0,12	0,04	0,14	0,07	0,37	-	-	-	-
Percentil 50		0,91	2,29	7,49	0,03	0,68	0,00	0,02	0,10	0,05	0,00	-	-	-	-
Percentil 25		0,51	1,88	6,98	0,01	0,64	0,00	0,01	0,07	0,02	0,00	-	-	-	-
Média		1,20	12,47	12,21	0,06	3,28	0,41	0,20	0,43	0,25	1,39	-	-	-	-
Máximo		2,79	58,52	57,84	0,11	6,56	1,76	0,88	1,98	1,11	5,00	-	-	-	-
Mínimo	80 - 100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	0,01	0,01	0,00	0,00	0,11	-	-	-	-
Percentil 75		1,71	2,01	3,00	0,10	4,20	0,19	0,05	0,17	0,06	1,00	-	-	-	-
Percentil 50		1,30	1,64	0,21	0,06	2,68	0,06	0,02	0,02	0,05	0,50	-	-	-	-
Percentil 25		0,20	0,17	0,00	0,04	2,33	0,01	0,02	0,00	0,01	0,33	-	-	-	-

Tabela 17 – Resultados de atributos químicos relacionados à mineralogia dos Gleissolos estudados.

Amostra	Prof. cm	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fe _d	Fe _o	Al _d	Al _o	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _{AS}	SI	Ki	Kr
g kg ⁻¹												cmol mol ⁻¹			
GLEISSOLOS															
59	0 - 20	59,55	137,04	245,81	0,91	3,72	20,10	8,78	5,32	5,10	0,44	0,48	-	3,05	1,25
	80 - 100	55,91	118,02	178,72	0,89	8,44	22,62	8,33	6,21	4,09	0,37	0,58	-	2,57	1,03
60	0 - 20	17,51	118,06	162,99	0,09	4,21	3,85	1,06	3,96	4,40	0,28	0,31	-	2,35	1,20
	80 - 100	62,39	190,72	231,83	0,09	8,24	19,51	0,50	2,13	0,85	0,03	0,45	-	2,07	0,92
61	0 - 20	29,75	87,16	147,32	0,23	2,98	37,85	10,48	5,15	3,94	0,28	1,82	-	2,87	1,26
	80 - 100	33,35	105,19	131,27	0,11	6,65	26,49	1,44	3,75	1,12	0,05	1,14	-	2,12	0,95
62	0 - 20	69,37	122,79	189,91	0,77	2,11	42,10	12,85	5,06	4,42	0,31	0,87	-	2,63	0,99
	80 - 100	62,89	165,79	237,96	0,45	4,44	31,59	7,53	3,82	1,16	0,24	0,72	-	2,44	1,04
63	0 - 20	53,11	115,57	231,12	0,58	2,53	21,65	8,34	5,46	5,43	0,39	0,58	-	3,40	1,37
	80 - 100	42,70	165,28	275,53	0,61	5,02	6,43	4,92	7,76	3,35	0,77	0,22	-	2,83	1,32
Média		45,86	116,12	195,43	0,52	3,11	25,11	8,30	4,99	4,66	0,34	0,81	-	2,86	1,21
Máximo		69,37	137,04	245,81	0,91	4,21	42,10	12,85	5,46	5,43	0,44	1,82	-	3,40	1,37
Mínimo		17,51	87,16	147,32	0,09	2,11	3,85	1,06	3,96	3,94	0,28	0,31	-	2,35	0,99
Percentil 75	0 - 20	59,54	122,79	231,12	0,77	3,72	37,85	10,48	5,32	5,10	0,39	0,87	-	3,05	1,26
Percentil 50		53,10	118,06	189,91	0,58	2,98	21,65	8,78	5,15	4,42	0,31	0,58	-	2,87	1,25
Percentil 25		29,74	115,57	162,99	0,23	2,53	20,10	8,34	5,06	4,40	0,28	0,48	-	2,63	1,20
Média		51,45	149,00	211,06	0,43	6,56	21,33	4,54	4,73	2,11	0,29	0,62	-	2,41	1,05
Máximo		62,89	190,72	275,53	0,89	8,44	31,59	8,33	7,76	4,09	0,77	1,14	-	2,83	1,32
Mínimo		33,35	105,19	131,27	0,09	4,44	6,43	0,50	2,13	0,85	0,03	0,22	-	2,07	0,92
Percentil 75	80 - 100	62,39	165,79	237,96	0,61	8,24	26,49	7,53	6,21	3,35	0,37	0,72	-	2,57	1,04
Percentil 50		55,91	165,28	231,83	0,45	6,65	22,62	4,92	3,82	1,16	0,24	0,58	-	2,44	1,03
Percentil 25		42,70	118,02	178,72	0,11	5,02	19,51	1,44	3,75	1,12	0,05	0,45	-	2,12	0,95

Tabela 19 – Resultados de atributos químicos relacionados à mineralogia das Terras Pretas do Índio estudados.

Amostra	Prof.	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Fe _d	Fe _o	Al _d	Al _o	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _{AS}	SI	Ki	Kr
	cm	g kg ⁻¹										cmol mol ⁻¹			
TERRAS PRETAS DO ÍNDIO															
68	0 – 20	79,38	130,21	170,65	0,99	7,83	71,61	3,44	10,66	3,31	0,05	1,29	18,25	2,23	0,81
	80 - 100	114,39	216,41	212,70	0,26	16,62	101,03	1,33	16,99	0,84	0,01	1,26	25,11	1,67	0,64
69	0 – 20	163,62	228,35	79,34	2,56	13,26	69,54	2,99	22,44	19,10	0,04	0,61	9,41	0,59	0,20
	80 - 100	197,86	263,18	117,47	0,95	28,90	67,94	1,94	23,50	3,32	0,03	0,49	38,76	0,76	0,25
70	0 – 20	21,21	65,30	57,24	0,75	2,47	41,54	2,43	15,70	11,32	0,06	2,80	18,82	1,49	0,66
	80 - 100	29,54	112,67	63,60	0,12	7,85	34,82	1,39	13,59	3,70	0,04	1,69	37,98	0,96	0,45
71	0 – 20	81,13	107,79	35,89	0,45	4,47	60,90	5,47	17,90	9,07	0,09	1,07	24,80	0,57	0,19
	80 - 100	127,64	193,61	30,44	0,26	17,11	72,72	1,43	27,37	2,40	0,02	0,81	42,03	0,27	0,09
Média		86,34	132,91	85,78	1,19	7,01	60,90	3,58	16,68	10,70	0,06	1,44	17,82	1,22	0,47
Máximo		163,62	228,35	170,65	2,56	13,26	71,61	5,47	22,44	19,10	0,09	2,80	24,80	2,23	0,81
Mínimo		21,21	65,30	35,89	0,45	2,47	41,54	2,43	10,66	3,31	0,04	0,61	9,41	0,57	0,19
Percentil 75	0 – 20	122,37	179,28	125,00	1,78	10,54	70,58	4,46	20,17	15,21	0,07	2,05	21,81	1,86	0,74
Percentil 50		80,25	119,00	68,29	0,87	6,15	65,22	3,22	16,80	10,19	0,05	1,18	18,54	1,04	0,43
Percentil 25		50,29	86,54	46,56	0,60	3,47	51,22	2,71	13,18	6,19	0,05	0,84	13,83	0,58	0,20
Média		117,36	196,47	106,05	0,40	17,62	69,13	1,52	20,36	2,57	0,03	1,06	35,97	0,92	0,36
Máximo		197,86	263,18	212,70	0,95	28,90	101,03	1,94	27,37	3,70	0,04	1,69	42,03	1,67	0,64
Mínimo		29,54	112,67	30,44	0,12	7,85	34,82	1,33	13,59	0,84	0,01	0,49	25,11	0,27	0,09
Percentil 75	80 - 100	162,75	239,79	165,08	0,60	23,00	86,87	1,69	25,43	3,51	0,03	1,47	40,40	1,32	0,55
Percentil 50		121,02	205,01	90,53	0,26	16,86	70,33	1,41	20,24	2,86	0,02	1,04	38,37	0,86	0,35
Percentil 25		71,97	153,14	47,02	0,19	12,24	51,38	1,36	15,29	1,62	0,02	0,65	31,55	0,51	0,17

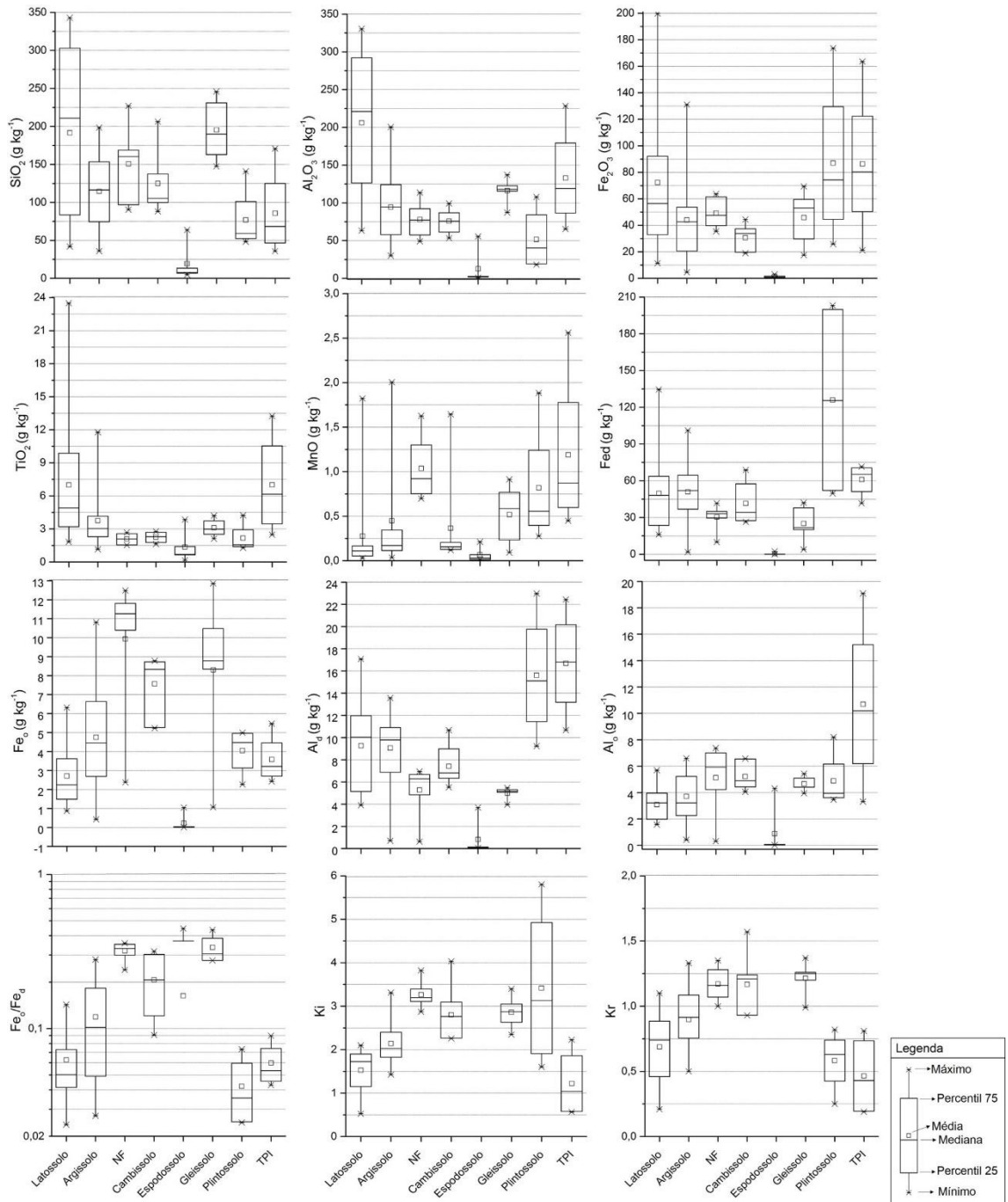


Figura 8 – Atributos químicos relacionados à mineralogia dos solos estudados na profundidade de 0 – 20 cm.

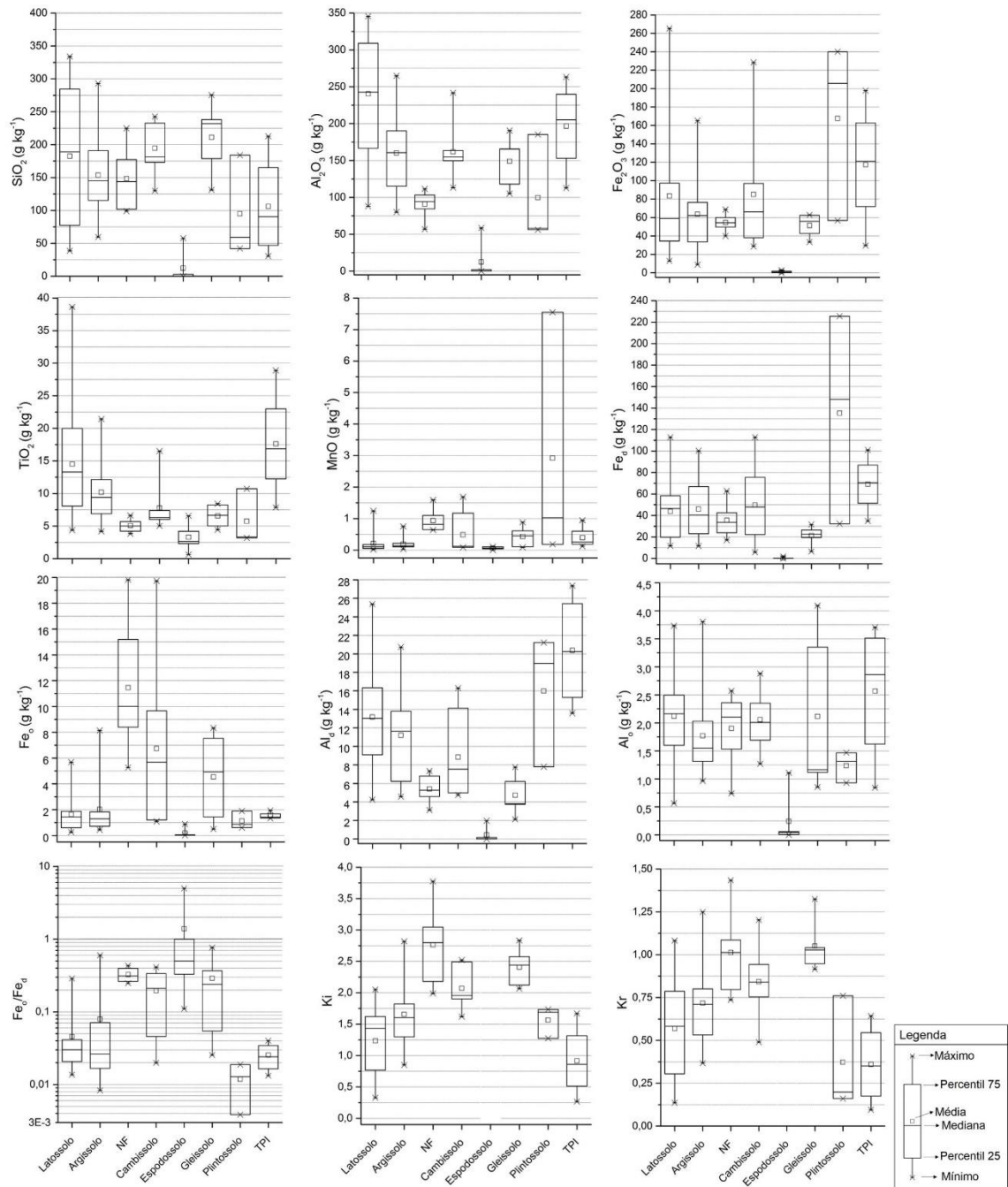


Figura 9 – Atributos químicos relacionados à mineralogia dos solos estudados na profundidade de 80 – 100 cm.

Dentre os solos analisados, os Latossolos apresentaram os maiores teores médios de Al_2O_3 com médias de 205 e 240 g kg^{-1} nas profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente. Já os Espodosolos apresentaram os menores teores de Al_2O_3 , com média de 12,5 g kg^{-1} para as duas profundidades.

As médias mais elevadas dos teores de Fe_2O_3 nos solos foram observadas na classe dos Plintossolos, com valores de 87 e 167 g kg^{-1} para as profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente. Apesar dos Plintossolos apresentarem as maiores médias,

os teores máximos de Fe_2O_3 foram observados, nas duas profundidades, na classe do Latossolos (199 e 265 g kg^{-1} nas camadas de 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente). Os menores teores foram observados nos Espodosolos, com valores inferiores a 5 g kg^{-1} .

Em superfície e subsuperfície, as maiores médias de TiO_2 foram obtidas nas TPI, com valores de 7 e 17,62 g kg^{-1} nas respectivas camadas. De maneira geral, os teores médios de TiO_2 em subsuperfície são duas vezes maiores que em superfície em todas as classes de solos. Observam-se em profundidade teores máximos de 38, 28 e 21 g kg^{-1} nos Latossolos, TPI e Argissolos, respectivamente.

Os teores médios de MnO foram inferiores a 2 g kg^{-1} nas duas profundidades de todos os solos, com exceção da camada de 80 – 100 cm dos Plintossolos, que apresentou um valor médio de 3 g kg^{-1} .

As maiores médias dos teores de ferro de boa cristalinidade (Fe_d) foram obtidas na classe dos Plintossolos, tanto em superfície quanto em subsuperfície, com teores médios de 126 e 135,26 g kg^{-1} nas respectivas profundidades. Já os Latossolos, Argissolos e Cambissolos apresentaram aproximadamente os mesmos teores médios em superfície (48 g kg^{-1}). Os Neossolos Flúvicos apresentaram um teor médio de 33 g kg^{-1} para ambas as profundidades, enquanto que, nesse caso, um valor médio de 23,21 g kg^{-1} foi obtido nos Gleissolos. Os menores teores de Fe_d foram observados na classe dos Espodosolos.

As formas de ferro com baixo grau de cristalinidade (Fe_o) apresentaram as maiores médias em superfície nas classes dos Neossolos Flúvicos e Gleissolos, com médias de 9,92 e 8,30 g kg^{-1} , respectivamente. Nos demais solos, os teores obtidos foram, de maneira geral, inferiores a 5 g kg^{-1} .

Os teores de Al associado às formas de ferro de boa cristalinidade (Al_d) apresentaram seus maiores teores médios nas TPI (16,7 e 20,4 g kg^{-1}), Plintossolos (15,6 e 16 g kg^{-1}), Latossolos (9,3 e 13,2 g kg^{-1}) e Argissolos (9,1 e 11,2 g kg^{-1}) nas duas profundidades. Já o Al associado às formas de ferro com baixo grau de cristalinidade (Al_o) apresentou nas TPI a maior média em superfície (10,79 g kg^{-1}), enquanto nos demais solos foram obtidos valores inferiores a 5 g kg^{-1} . Em profundidade todos os solos apresentaram valores inferiores a 3 g kg^{-1} .

A relação entre o ferro extraído com ditionito-citrato (Fe_d) e o ferro extraído em ácido sulfúrico (Fe_{AS}), para as profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, pode ser observada na figura 10. De maneira geral, os Latossolos apresentaram comportamento distinto nas duas profundidades. Em superfície, a relação $\text{Fe}_d/\text{Fe}_{AS}$ foi próxima de 1,

enquanto que em subsuperfície essa relação foi inferior a 1 em parte das amostras. As amostras 7, 14, 16, 18, 19 e 20 apresentaram, em ambas as profundidades, valores dessa relação superiores a 1.

Na profundidade de 0 – 20 cm, os Argissolos, Cambissolos e Plintossolos apresentaram, de maneira geral, relação Fe_d/Fe_{AS} superior a 1, enquanto que nos Gleissolos tal relação foi inferior a 1. Já os Neossolos Flúvicos e as Terras Pretas de Índio apresentaram relação com valores próximos a 1. Ainda em superfície, observou-se que algumas amostras de Argissolos apresentaram relação Fe_d/Fe_{AS} superior a 4.

Em subsuperfície, observou-se que parte das amostras de Argissolos, Neossolos Flúvicos, Cambissolos e das Terras Pretas de Índio apresentaram relação superior a 1, com o restante das amostras apresentando relação inferior a 1. Os Gleissolos e Plintossolos, de maneira geral, apresentaram amostras com relação Fe_d/Fe_{AS} inferior a 1.

Os resultados da substituição isomórfica (SI) de Fe por Al, nas duas profundidades analisadas, podem ser observados na figura 11. Observou-se que os resultados para SI são maiores em subsuperfície nos solos estudados.

Na profundidade de 80 – 100 cm, os Latossolos, TPI e Argissolos apresentaram os maiores valores para SI, com médias de 37, 36 e 33 $cmol\ mol^{-1}$, respectivamente. Ainda nesta profundidade, os Cambissolos apresentaram valores médios de SI da ordem de 30 $cmol\ mol^{-1}$. As menores médias para SI foram encontradas nos Plintossolos (22 $cmol\ mol^{-1}$).

Observou-se ainda que, para a profundidade de 80 – 100 cm, parte das amostras de Latossolos, Argissolos, TPI, Cambissolos e Plintossolos apresentaram valores para SI maiores que o limite máximo para goethitas sintéticas.

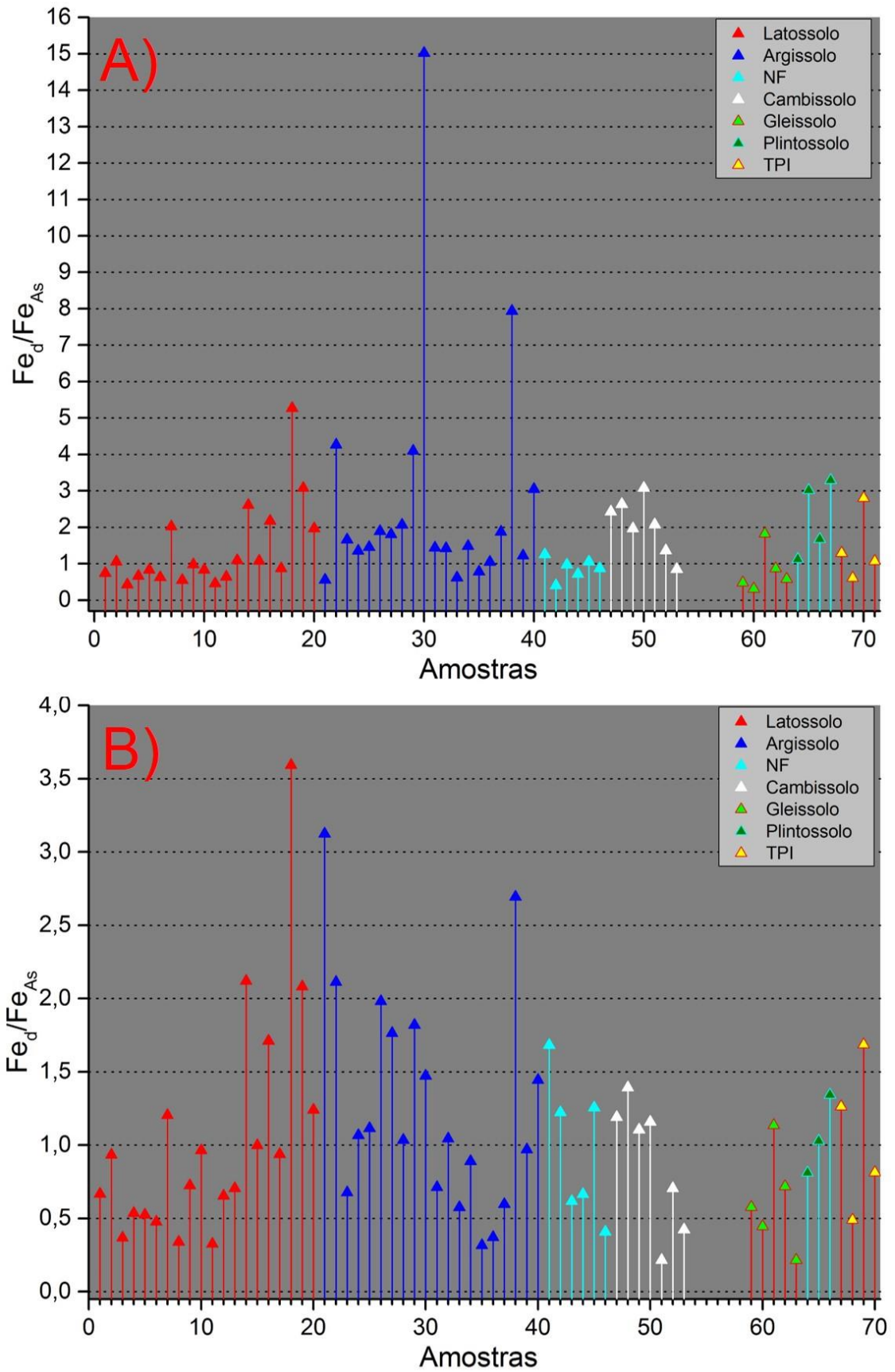


Figura 10 – Relação entre os teores de ferro extraído com ditionito-citrato (Fe_d) e extraído com ácido sulfúrico (Fe_{As}) no solos estudados, nas profundidades de 0- 20 (A) e 80 – 100 cm (B).

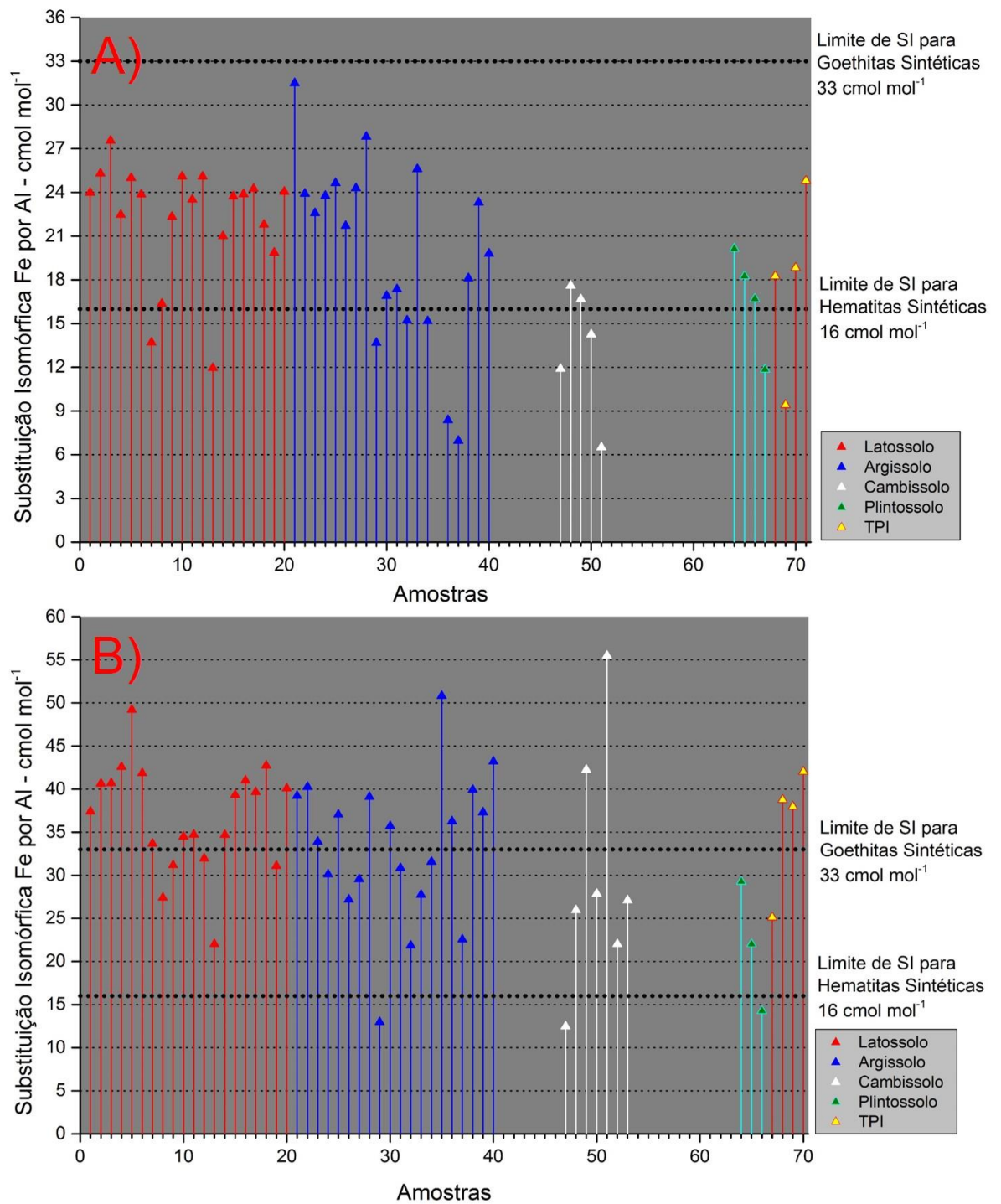


Figura 11 – Substituição isomórfica de Fe por Al nos óxidos de ferro da fração argila de solos estudados nas profundidades de 0 – 20 (A) e 80 – 100 cm (B).

2.3.4 Análise multivariada relacionada à mineralogia dos solos

Os resultados referente a extração dos autovalores para a determinação das componentes principais relacionadas à mineralogia dos solos nas duas profundidades analisadas podem ser observados na tabela 20. Na profundidade de 0 – 20 cm, 82,36 %

da variação dos dados é explicada por 3 componentes principais, onde as componentes 1 e 2 explicam 31,02 e 30,35 % desta variação, respectivamente. Na profundidade de 80 – 100 cm, somente as 4 primeiras componentes principais apresentam autovalores totais maiores que 1 e são responsáveis por explicar 86,88 % da variação dos dados nesta profundidade.

O resultado para a carga fatorial de cada variável em relação as componentes com autovalores maiores que 1 após a rotação pelo método Varimax estão na tabela 21. As cargas fatoriais de cada variável e os escores fatoriais de cada observação (amostras de solos) para as duas primeiras componentes são exibidos nas figuras 12 e 13.

Tabela 20 - Resultados dos autovalores para a extração das componentes principais e variância total explicada pelas componentes para a profundidade de 0 – 20 e 80 – 100 cm dos solos estudados.

0 - 20 cm						
Componentes	----- Autovalores iniciais -----			Autovalores após rotação Varimax		
	Total	% de Variância	Cumulativa	Total	% de Variância	Cumulativa
1	5,695	47,46	47,46	3,723	31,023	31,023
2	2,519	20,991	68,451	3,642	30,348	61,371
3	1,669	13,907	82,358	2,518	20,987	82,358
4	0,796	6,634	88,991			
5	0,593	4,945	93,936			
6	0,28	2,337	96,273			
7	0,256	2,131	98,405			
8	0,077	0,64	99,045			
9	0,049	0,407	99,452			
10	0,036	0,298	99,75			
11	0,021	0,174	99,924			
12	0,009	0,076	100			

80 - 100 cm						
Componentes	----- Autovalores iniciais -----			Autovalores após rotação Varimax		
	Total	% de Variância	Cumulativa	Total	% de Variância	Cumulativa
1	4,281	35,679	35,679	3,423	28,525	28,525
2	3,069	25,576	61,255	3,017	25,144	53,669
3	2,001	16,671	77,926	2,593	21,611	75,280
4	1,074	8,951	86,877	1,392	11,597	86,877
5	0,655	5,455	92,333			
6	0,337	2,807	95,140			
7	0,300	2,497	97,637			
8	0,102	0,854	98,491			
9	0,076	0,631	99,122			
10	0,060	0,498	99,620			
11	0,031	0,260	99,880			
12	0,014	0,120	100,000			

Tabela 21 - Resultado da matriz das cargas fatoriais para as componentes principais após rotação pelo método Varimax na profundidade de 0 – 20 e 80 – 100 cm.

0 - 20 cm				80 - 100 cm				
----- Componentes -----				----- Componentes -----				
Variáveis	1	2	3	Variáveis	1	2	3	4
Fe ₂ O ₃	0,574	0,533	0,391	Fe ₂ O ₃	0,457	-0,117	0,834	-0,010
Al ₂ O ₃	0,929	0,292	-0,051	Al ₂ O ₃	0,952	-0,054	0,126	0,098
SiO ₂	0,929	-0,19	0,217	SiO ₂	0,742	0,626	0,090	0,063
MnO	0,194	0,11	0,818	MnO	-0,086	0,336	0,752	0,058
TiO ₂	0,766	0,394	0,01	TiO ₂	0,751	-0,195	0,116	0,171
Fe _d	0,072	0,714	0,473	Fe _d	0,206	-0,345	0,842	0,075
Al _d	0,074	0,88	0,365	Al _d	0,367	-0,580	0,529	0,363
Fe _o	-0,054	0,005	0,874	Fe _o	-0,153	0,446	0,510	0,561
Al _o	0,036	0,423	0,703	Al _o	0,238	0,038	0,018	0,933
Argila	0,936	0,204	0,021	Argila	0,957	0,100	0,095	0,011
Ki	-0,329	-0,822	0,138	Ki	-0,069	0,950	0,105	0,021
Kr	-0,207	-0,943	-0,104	Kr	0,102	0,943	-0,165	0,154

As variáveis que apresentaram cargas fatoriais maior que 0,7 estão destacadas na matriz fatorial.

Na profundidade de 0 – 20 cm, as variáveis SiO₂ (0,929), Al₂O₃ (0,929), e argila (0,936) e TiO₂ (0,766) apresentam as maiores cargas fatoriais positivas e estão distribuídas na direção positiva da componente principal 1. Já as variáveis Ki (- 0,822) e Kr (- 0,943) apresentam cargas fatoriais negativas na componente principal 2, enquanto as variáveis Fe_d (0,714) e Al_d (0,88) têm cargas positivas e explicam a maior variabilidade dos dados para esta profundidade (Tabela 21 e Figura 12).

Em relação a distribuição dos solos nas duas componentes na profundidade de 0 – 20 cm, os Latossolos estão, de forma geral, distribuídos principalmente no 1° e 4° quadrantes formando assim o grupo 1 e estas amostras estão na direção positiva da componente principal 1, na mesma direção das variáveis SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ e argila (Figura 12). Os Argissolos estão distribuídos principalmente no grupo 2, próximo do eixo central das duas componentes e não apresentam uma relação direta com alguma variável que apresente elevado poder de explicação para a variabilidade dos dados. O grupo 3 é formado principalmente por Gleissolos, Cambissolos e Neossolos Flúvicos e algumas amostras dos Argissolos que estão distribuídos no 3° e 4° quadrantes, na direção negativa da componente 1, estes solos apresentam a mesma tendência de distribuição das variáveis Ki e Kr. Já as amostras das Terras Pretas de Índio estão mais dispersas e não estão formando um grupo definido. Os Plintossolos estão distribuídos no 2° quadrante e, de certa forma, estão na direção positiva da componente principal 2, onde estão as variáveis Fe_d e Al_d. O grupo 4 é formado somente por Espodossolos e apresentam comportamento diferenciando em relação aos demais solos e estão distribuídos no 3° quadrante.

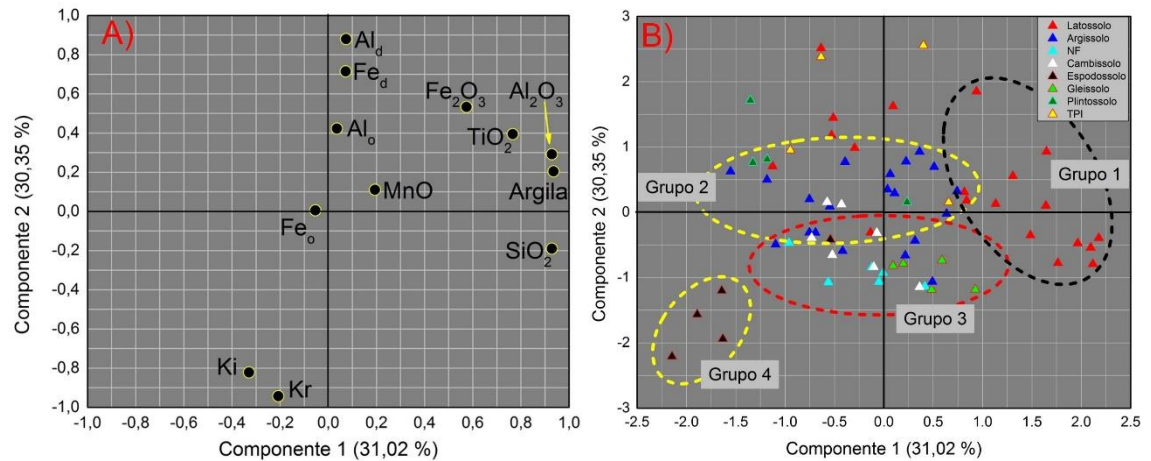


Figura 12 – Distribuição das cargas fatoriais para as variáveis químicas relacionadas a mineralogia do solo (A) e distribuição dos escores de cada observação (amostra de solo) (B), para a camada superficial (0 – 20 cm) de solos estudados.

Na profundidade de 80 – 100 cm, as variáveis que explicam maior parte da variação dos dados na componente principal 1, são as mesmas que foram encontradas em superfície, Al₂O₃ (0,952), SiO₂ (0,742), TiO₂ (0,751) e argila (0,957), enquanto na componente principal 2 somente Ki (0,950) e Kr (0,943) apresentaram carga fatorial maior que 0,7 e são consideradas relevantes na explicação dos dados (Tabela 21).

A distribuição dos solos em profundidade parece também seguir a mesma tendência encontrada na superfície, onde parte dos Latossolos estão distribuídos na direção positiva da componente 1, formando o grupo 1 (Figura 13). Os Argissolos, de maneira geral, estão no grupo 2 e estão organizados próximos ao eixo central das componentes principais. Formando o grupo 3, estão os Gleissolos, Cambissolos e algumas amostras de Argissolos que estão associados aos índices Ki e Kr, estando distribuídos principalmente no 2º quadrante.

Destaque nesta camada subsuperficial é a formação do grupo 4, composta principalmente pela demais amostras dos Latossolos, por duas amostras de Plintossolos e por amostras de Terra Preta do Índio e alguns Argissolos. Estas amostras estão distribuídas na direção negativa da componente principal 2, a mesma direção das variáveis Fe_d e Al_d (Figura 13).

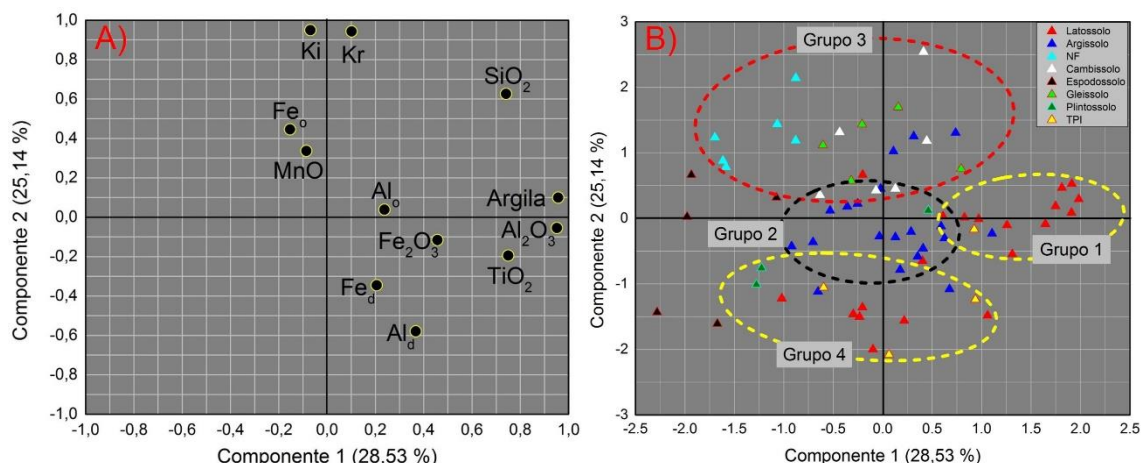


Figura 13 – Distribuição das cargas fatoriais para as variáveis químicas relacionadas a mineralogia do solo (A) e distribuição dos escores de cada observação (amostra de solo) (B), para a camada superficial (80 – 100 cm) dos solos estudados.

2.3.5 Mineralogia da fração argila

Os difratogramas de raios - X da fração argila dos solos são apresentados nas figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19. De maneira geral, os principais minerais identificados foram: caulinita, ilita, gibbsita, goethita, hematita e minerais do tipo 2:1.

Os Latossolos apresentaram caulinita, gibbsita e goethita como os principais minerais da fração argila e, em menor escala foram encontradas ilitas e picos de minerais do tipo 2:1 (lâminas orientadas). Nos Latossolos pode-se ainda destacar a presença de um grupo de amostras com picos de maior intensidade para caulinita (Figura 14 A e B) e outro grupo de amostras com picos de maior intensidade para gibbsita (Figura 14 C e D).

Os minerais mais comuns na fração argila dos Argissolos foram a caulinita, ilita, gibbsita, goethita e, em algumas amostras com a ocorrência do mineral do tipo 2:1. Observou-se que os Argissolos apresentaram três grupos de amostras em relação à mineralogia: o primeiro grupo formado principalmente por solos com mineralogia predominantemente caulínica (Figura 15 A e B), o segundo grupo com solos com a presença de picos de boa intensidade de gibbsita e caulinita (Figura 15 C e D) e um terceiro grupo com predomínio de amostras de solo com caulinita e ilita (Figura 16 A e B).

Os Neossolos Flúvicos (Figura 16 C e D), Cambissolos (Figura 17 A e B) e Gleissolos (Figura 15 C e D) apresentaram, de maneira geral, mineralogia semelhante, com a presença de mineral do tipo 2:1 (vermiculita e/ou clorita), ilita e caulinita. Algumas amostras dos Cambissolos apresentaram picos para a goethita, enquanto, o quartzo foi encontrado em uma amostra pertencente aos Neossolos Flúvicos.

Ilita, caulinita e gibbsita foram os minerais presentes na fração argila do Espossolo (Figura 18 A e B). Caulinita, gibbsita, hematita, goethita e ilita foram os minerais encontrados na fração argila dos Plintossolos (Figura 18 C e D). Por fim, caulinita, gibbsita, hematita e goethita foram os minerais encontrados nas Terras Pretas de Índio (Figura 19 A e B).

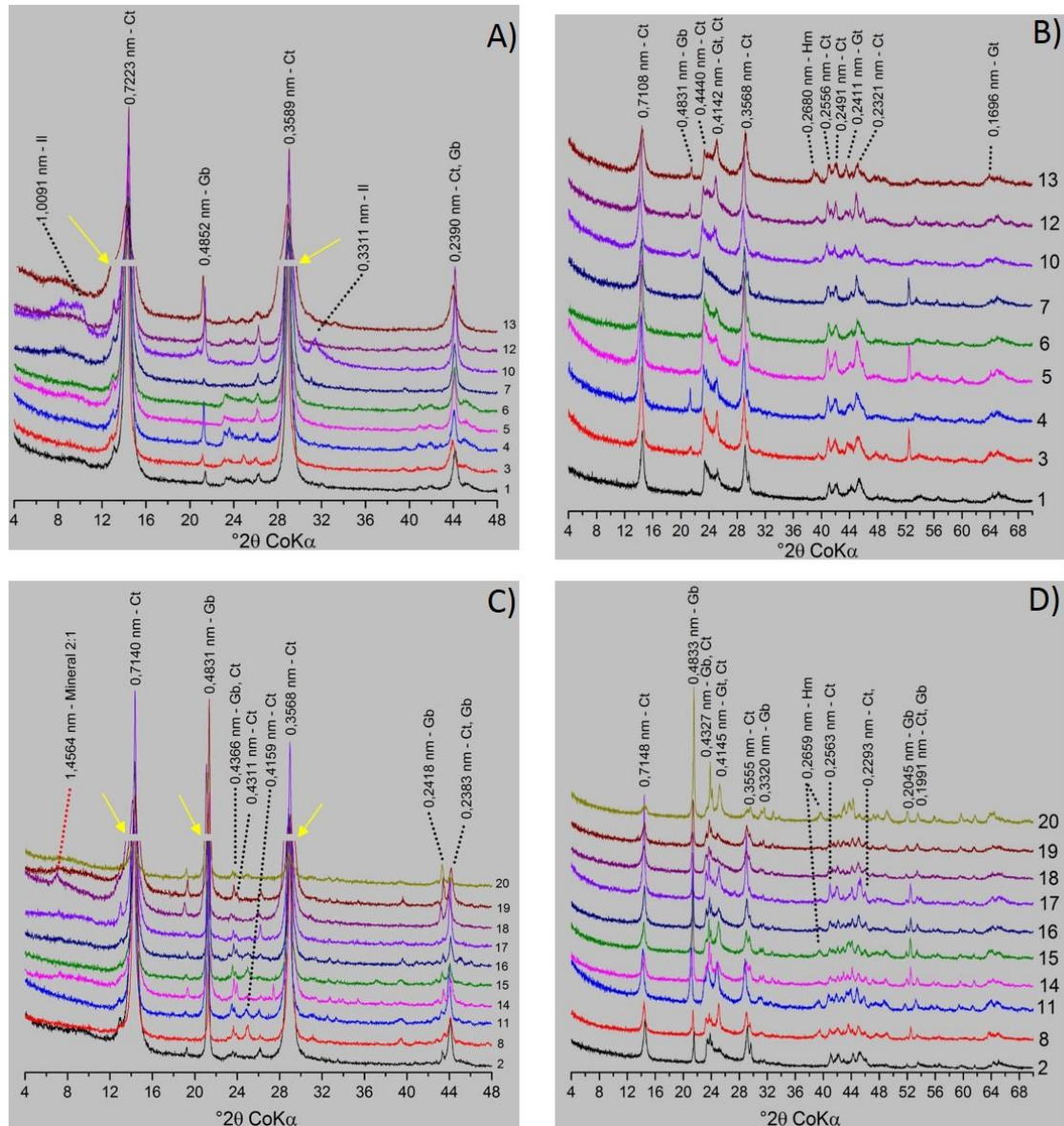


Figura 14 - Difratomia de raios - X da fração argila dos Latossolos (A, B, C, e D). Amostras desferriçadas e orientadas (A) e amostras escavadas e naturais (B) para o grupo dos Latossolos que apresentaram predominância de caulinita. Amostras desferriçadas e orientadas (C) e amostras escavadas e naturais (D) para o grupo dos Latossolos com predominância de caulinita e gibbsita. Mineral do tipo 2:1; Ct- caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Il – ilita.

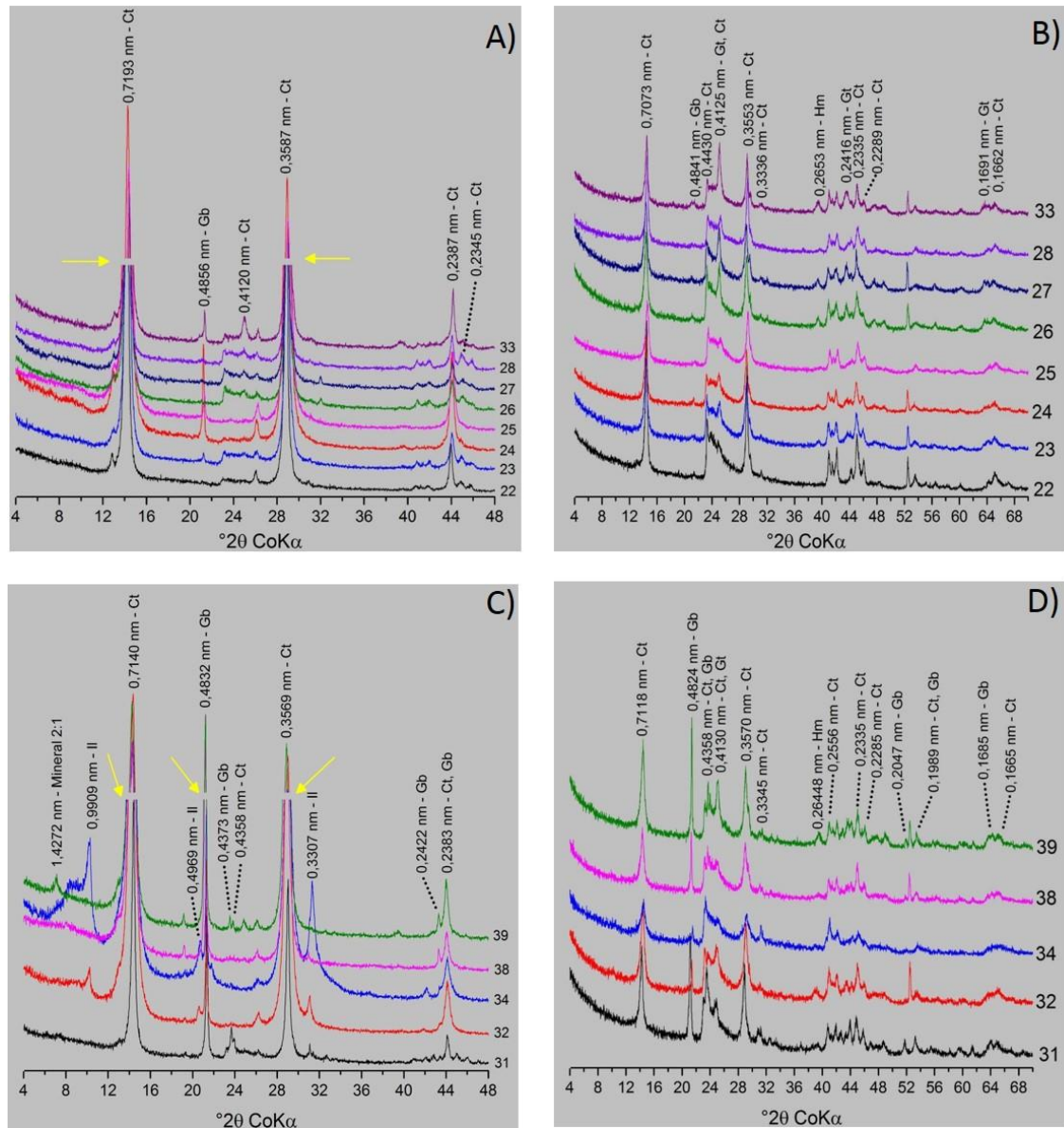


Figura 15 - Difratomia de raios – X da fração argila dos Argissolos (A, B, C, e D). Amostras desferrificadas e orientadas (A) e amostras escavadas e naturais (B) para os Argissolos que apresentaram predominância de caulinita. Amostras desferrificadas e orientadas (C) e amostras escavadas e naturais (D) para os Argissolos com predominância de caulinita e gibbsita. Mineral do tipo 2:1; Ct- caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Il – ilita.

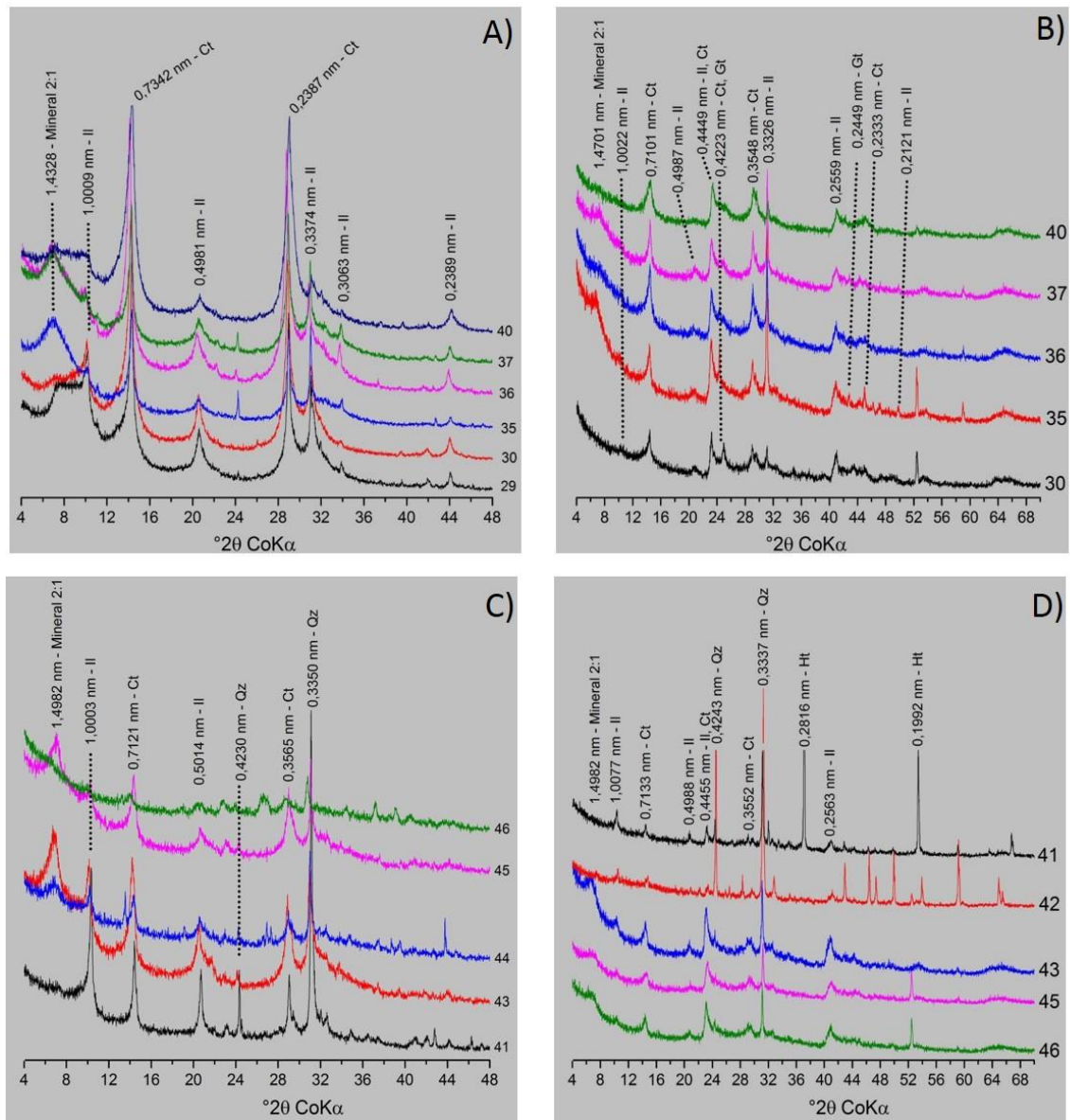


Figura 16 - Difratomia de raios – X da fração argila dos Argissolos (A e B) e Neossolos Flúvicos (C e D). Amostras desferrificadas e orientadas (A) e amostras escavadas e naturais (B) para o grupo de amostras dos Argissolos que apresentaram predominância de caulinita e mica. Amostras desferrificadas e orientadas (C) e amostras escavadas e naturais (D) para a classe dos Neossolos Flúvicos. Mineral do tipo 2:1; Ct- caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Il – ilita; Qz – quartzo; Ht – Halita.

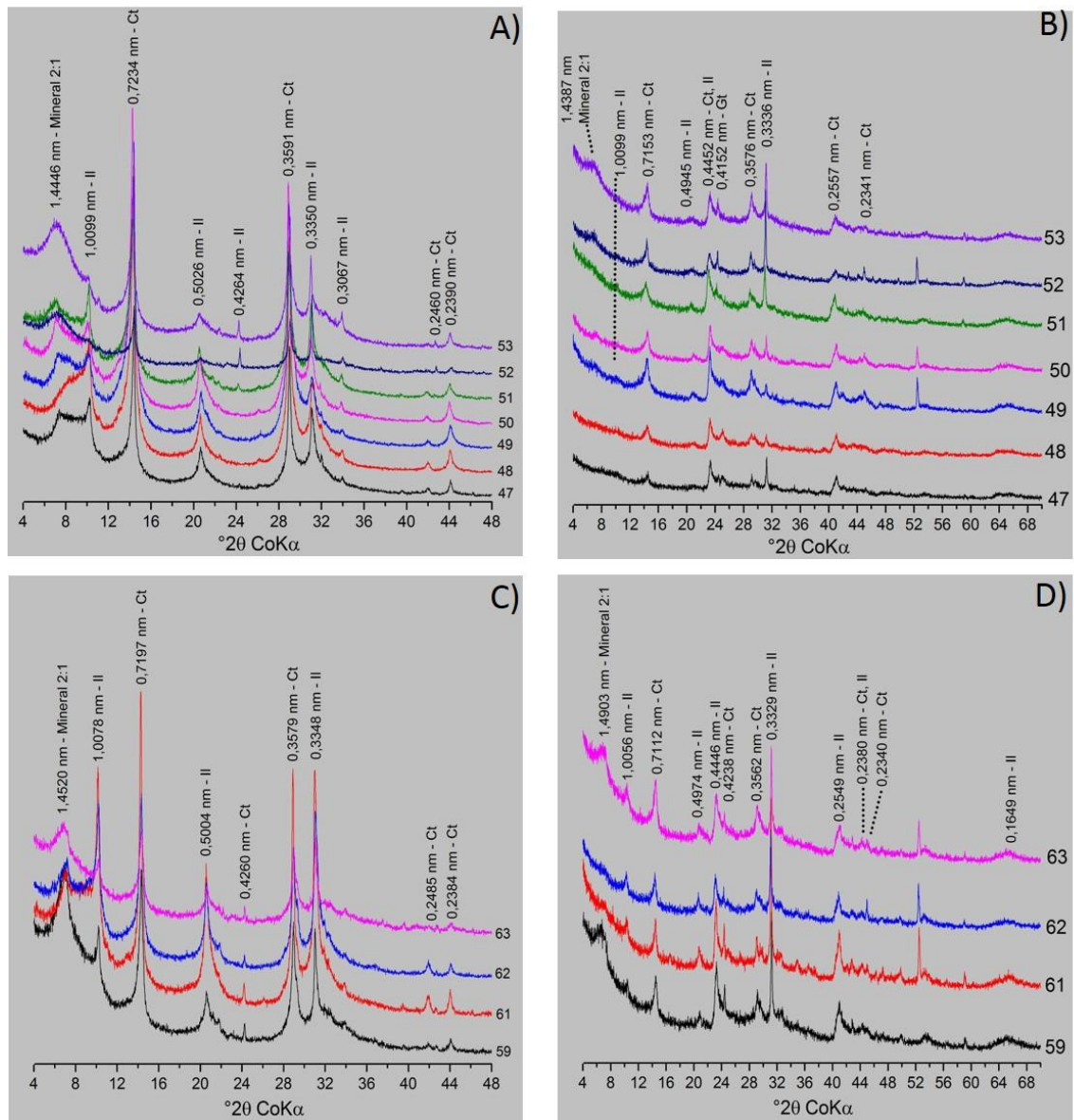


Figura 17 - Difratometria de raios – X da fração argila dos Cambissolos (A e B) e Gleissolos (C e D). Amostras desferriçadas e orientadas (A) e amostras escavadas e naturais (B) para o grupo de amostras dos Cambissolos. Amostras desferriçadas e orientadas (C) e amostras escavadas e naturais (D) para a classe dos Gleissolos. Mineral do tipo 2:1; Ct- caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Il – ilita.

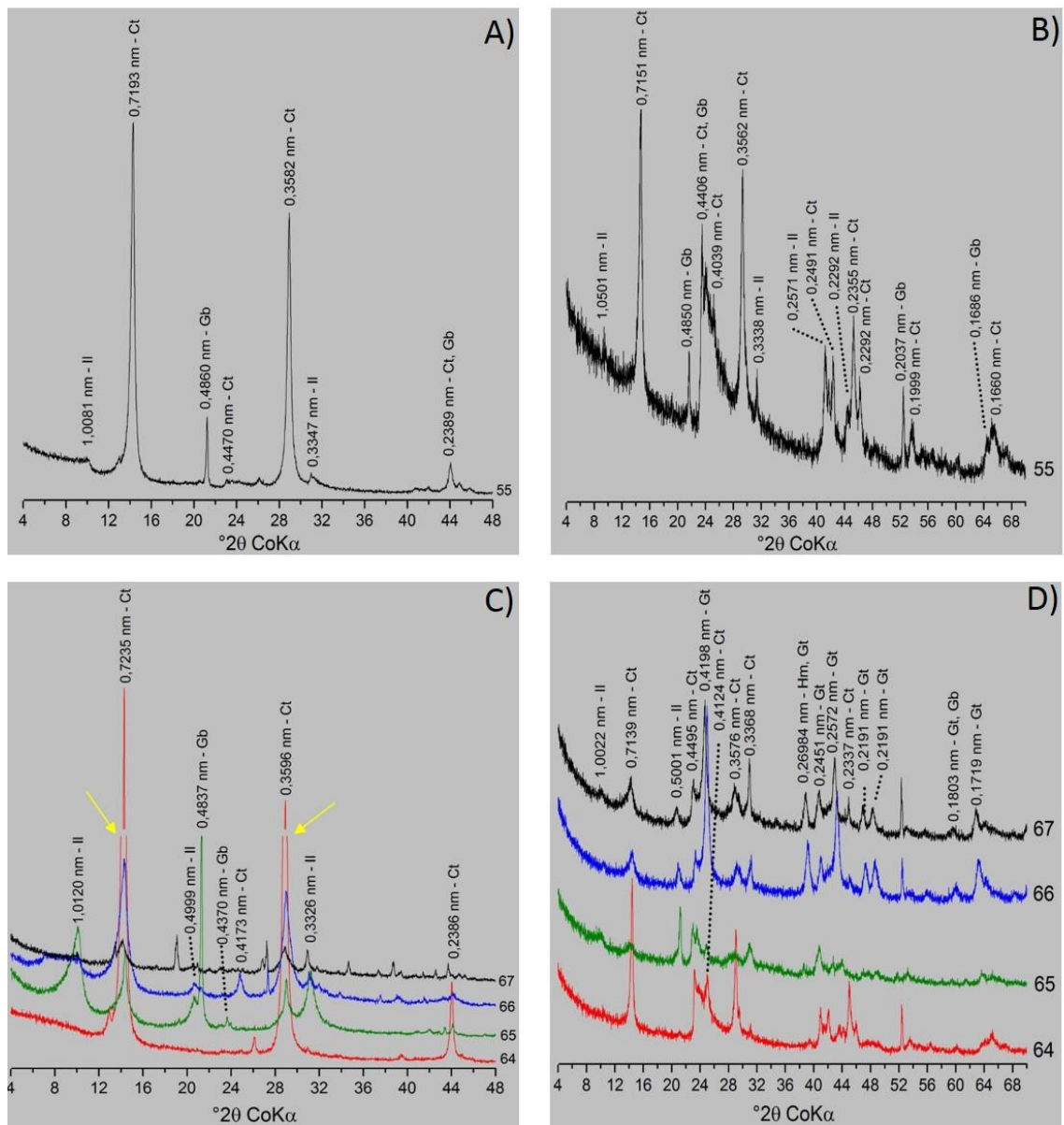


Figura 18 - Difractometria de raios – X da fração argila dos Espodosolos (A e B) e Plintossolos (C e D). Amostras desferrificadas e orientadas (A) e amostras escavadas e naturais (B) para a classe dos Gleissolos. Amostras desferrificadas e orientadas (C) e amostras escavadas e naturais (D) para a classe dos Plintossolos. Ct- caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – Hematita; Il – illita.

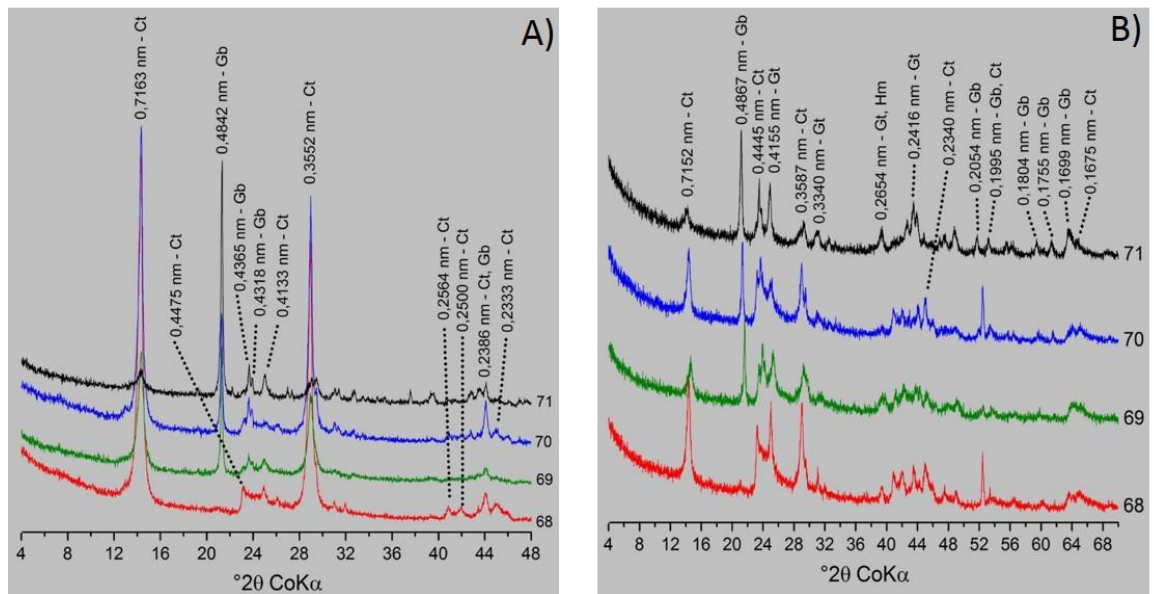


Figura 19 - Difratometria de raios – X da fração argila das Terras Pretas de Índio. Amostras desferrificadas e orientadas (A) e escavadas e naturais (B). Ct- caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm– hematita.

2.4 DISCUSSÃO

2.4.1 Atributos físicos dos solos e químicos relacionados à fertilidade

Os dados de subsuperfície evidenciaram que os solos do estado do Amazonas apresentam, de maneira geral, textura argilosa a muito argilosa e, de certa forma, refletem o material de origem sobre o qual foram formados (rochas sedimentares, argilitos, siltitos e folhelhos, representados principalmente pelas formações Alter do Chão, Solimões e Içá) (REIS, ALMEIDA, 2006). Este comportamento foi também observado por Campos et al. (2012) em superfícies geomórficas na região de Humaitá (sul do estado Amazonas), onde os autores encontraram teores de 382 a 627 g kg⁻¹ de argila e associaram tais teores à natureza do material de origem dos solos (sedimentos andinos e subandinos).

Este comportamento de solos com elevados teores de argila também foram encontrados por Botschek et al. (1996) em uma toposequência no município de Itacoatiara - Amazonas, onde os teores de argila variaram de 510 – 841 g kg⁻¹, tendo como material de origem dos solos os argilitos da Formação Alter do Chão. Segundo os autores, a presença de solos com menores teores de argila nesta toposequência está relacionada a processos pedogenéticos como eluviação e remoção lateral de argila

Nas áreas com predomínio de rochas ígneas e metamórficas, associadas aos Escudos das Guianas e Brasil Central, os Latossolos e Argissolos (solos de maior

ocorrência nessas áreas) também apresentam textura argilosa a muita argilosa e estão refletindo as condições de maior intemperismo nestas áreas mais estáveis da paisagem. Campos et al. (2011), em estudos de solos sobre rochas graníticas na região de Santo Antônio do Matupi – AM, encontraram teores de argila entre 400 – 744 g kg⁻¹ e associaram tais teores à maior atividade de intemperismo ao qual os solos foram submetidos. Segundo os autores, a variação existente entre os teores de argila dos solos está relacionada aos processos pedogenéticos e à variação do relevo nesta região.

A presença de Latossolos e de Argissolos com teores de argila menores que a média geral para cada classe de solo, pode estar relacionado ao próprio material de origem destes solos, como os arenitos encontrados na Formação Alter do Chão, ou aos processos pedogenéticos, como transformação e/ou remoção de argila do perfil do solo.

Os menores teores de argila encontrados nos Espodosolos, parece estar relacionado com o seu processo de gênese, conforme Dubroeuq e Volkoff (1998) existem três hipóteses sobre a gênese dos Espodosolos na Amazônia e, como consequência, a explicação para a presença de baixos teores de argila nestes solos. Segundo os autores, a gênese dos solos poderia estar relacionada com (1) o material de formação composto de sedimentos grosseiros, (2) os sedimentos coluviais transportados de áreas elevadas e (3) a transformação progressiva de Latossolos em Espodosolos. Os autores afirmam que a hipótese mais aceita é a da transformação de Latossolos em Espodosolos, onde ocorre a depleção da fração argila por hidrólise ácida e a remoção dos óxidos de ferro do perfil do solo, com posterior acumulação de minerais de maior resistência aos efeitos da hidrólise (ex: quartzo), constituindo assim a fração areia desses solos. Além disso, Horbe et al. (2004) sugerem que os Espodosolos próximos de Manaus - AM têm sua gênese relacionada a movimentos neotectônicos e que tais movimentos permitiram a exposição de arenitos e saprolitos areno-argilosos.

Os resultados dos atributos químicos para cada classe de solo, aliados aos resultados da análise multivariada (análise de componentes principais) permitiram uma melhor discussão dos dados quanto à fertilidade química dos solos.

Observou-se que as maiores médias das variáveis químicas relacionadas à fertilidade dos solos foram obtidas em superfície e tais valores refletem a adição de compostos orgânicos da própria floresta, como galhos, folhas e flores que, ao se decompor, liberam macro e micronutrientes no solo (BRINKMANN, 1989; DEMATTÊ, DEMATTÊ, 1993; MOREIRA, FAGERIA, 2009). Sabe-se ainda que em florestas tropicais, principalmente nas áreas de terra firme, onde os solos são pobres em nutrientes,

a ciclagem tem um papel fundamental na manutenção da biodiversidade destas áreas (VITOUSEK, SANFORD, 1986; QUESADA et al., 2011). Já nas áreas de várzea, os efeitos das inundações com carreamento de sedimentos são responsáveis pela maior fertilidade desses solos.

Apesar da contribuição da matéria orgânica na liberação de nutrientes no solo por meio da ciclagem, os solos de terra firme do estado do Amazonas são considerados de baixa fertilidade. Os Latossolos e Argissolos desenvolvidos sobre rochas ígneas ou metamórficas dessa região, por exemplo, estão sob constante intemperismo químico, promovendo, dessa forma, a remoção de nutrientes do sistema (QUESADA et al., 2011).

Os Latossolos, Argissolos e Cambissolos formados sobre as formações Alter do Chão e Içá também apresentam baixa fertilidade e tal fato encontra-se associado a pobreza química do material de origem, bem como, a remoção dos nutrientes do solo em decorrência do elevado intemperismo químico nessa região do Brasil. Nesse sentido, Lima (2001) e Martins et al. (2006), conduziram estudos em áreas de vegetação nativa no estado do Amazonas e observaram baixos valores de nutrientes em Latossolos e Plintossolos e associaram tais valores à pobreza do material de origem e à intensa lixiviação à qual esses solos foram submetidos durante sua gênese.

Marques et al. (2010), em estudos sobre uma topossequência de Latossolos na região de Parintins – AM, também verificaram que os solos apresentavam baixa fertilidade natural e relacionaram tal fato ao intemperismo a que os solos foram submetidos. Além disso, os autores afirmam que a matéria orgânica desempenha um papel importante em suprir a demanda de nutrientes das plantas por meio da ciclagem.

Ainda em relação aos solos de terra firme, observa-se que Plintossolos e Espodossolos também são caracterizados por uma menor fertilidade natural. Lima et al. (2006), estudando uma topossequência sobre a Formação Solimões, encontraram para a classe dos Plintossolos a menor riqueza de nutrientes, quando comparados aos demais solos da região, e associaram tal fato à posição na paisagem na qual os Plintossolos estão dispostos. Segundo os autores, estes solos são passíveis de saturação por água ou submersão por elevação do nível do lençol freático e os elementos de maior mobilidade (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) podem ser removidos do perfil com a drenagem natural. Já Garcia et al. (2013) estudaram perfis de Plintossolos na região do Médio Amazonas e encontraram solos pobres em nutrientes em todo o perfil, associando tal fato às altas temperaturas e quantidades de chuvas na região, que proporcionam o aumento da lixiviação de bases no perfil do solo. Nesse mesmo sentido, os Espodossolos formados a partir de Latossolos

também apresentam baixa fertilidade, fato este relacionado aos baixos teores de argila (fonte de carga negativa para retenção de bases) e a uma maior quantidade de areia (quartzo, que apresenta baixa superfície específica).

A análise de componentes principais indicou, principalmente em superfície, a presença de alguns Argissolos (amostras 35, 36 e 37) e Cambissolos (amostras 51, 52 e 53) que estão formando o grupo 3 que encontra-se na direção positiva da 1ª componente principal e que estão plotadas também na direção de variáveis relacionadas à fertilidade química dos solos (Figura 6 e 7). Tais solos estão localizados nos municípios de Benjamin Constant e Atalaia do Norte – AM e são formados por sedimentos da Formação Solimões, sendo caracterizados por uma maior fertilidade natural quando comparados aos demais solos das Formações Alter do Chão e Içá.

A Formação Solimões é composta por argilitos avermelhados a acinzentados, arenitos conchíferos e sedimentos andinos. Lima et al. (2006), em estudo na região supracitada, também encontraram solos com maior fertilidade em relação aos demais do estado do Amazonas e relacionaram tal fato ao material de origem e ao menor intemperismo no local. O menor grau de intemperismo nessa região é facilmente observado pela presença de conchas em profundidade, fato este também observado pelos referidos autores. Marquez et al. (2002) identificaram nesta região solos com fertilidade superior aos demais solos de terra firme da Amazônia e associaram tal resultado ao material de origem (sedimentos andinos), que apresenta minerais primários como mica e clorita. De fato, as amostras de solo coletadas nessa região do estado Amazonas (amostras 35, 36, 37, 51, 52 e 53) apresentaram na fração argila mineralogia do tipo 2:1 (Figuras 14A e 15A).

Análise de componentes principais indicou a formação do grupo 1, composto principalmente pelos Neossolos Flúvicos, Gleissolos e as Terras Pretas de Índio, e que, estão na direção positiva da 1ª componente principal, direção essa oposta às demais classes de solos, principalmente aos de terra firme, como os Latossolos e Argissolos (grupo 2). Assim, a formação destes dois grupos e o comportamento diferenciado desses solos ilustram, de fato, os ambientes de várzea e as TPI como as áreas de maior fertilidade no estado do Amazonas. Além disso, o grupo 3 onde estão os solos formados a partir das rochas da Formação Solimões, também apresentam uma fertilidade química superior aos demais solos de terra firme.

Sabe-se que os Neossolos Flúvicos, Gleissolos e as TPI apresentam características químicas que os distinguem dos demais solos da região Amazônica. Os

maiores teores de bases trocáveis em Gleissolos e Neossolos Flúvicos refletem a natureza recente dos constituintes minerais destes solos e a elevada atividade química da fração argila, formada por minerais com elevada CTC, como vermiculita e montmorilonita. A ocorrência destes minerais nos solos de várzea da região Amazônica está relacionada aos sedimentos andinos que são carregados pelos afluentes dos grandes rios da região e, além disso, estes sedimentos são ricos em minerais pouco intemperizados, como ilita, clorita, esmectita e vermiculita (MARTINELLI et al., 1993; GUYOT et al., 2007; GUIMARÃES et al., 2013). Ainda nesse sentido, a presença de minerais do tipo 2:1, conferindo aos solos uma maior fertilidade, permite o maior uso agrícola destes, uma vez que apresentam uma fertilidade muito maior que os solos de terra firme, o que contribui para a fixação de populações humanas nessas áreas (MARTINELLI et al., 1993).

As Terras Pretas de Índio são diferentes dos demais solos por apresentarem uma maior fertilidade, que está relacionada às atividades antigas dos povos indígenas que habitaram a região Amazônica durante os últimos 2450 anos (GLASER, BIRK, 2012). Atividades relacionadas à queima de resíduos orgânicos, produzindo biocarvões e cinzas, bem como resto de plantas e animais (ex: espinhas de peixes), podem explicar o estoque de nutrientes observado nas TPI, o que torna estes solos de maior fertilidade natural (LIMA et al., 2002; GLASER, BIRK, 2012). Estima-se que 10 % da região Amazônica seja ocupada por TPI e tais solos são encontrados principalmente em áreas de terra firme e, em menor proporção, nas áreas de várzea, sendo esses solos atualmente utilizados por pequenos agricultores na produção de alimentos (GLASER, BIRK, 2012).

A análise multivariada tem sido uma ferramenta bastante utilizada em estudos de solos, inclusive em outras áreas da região Amazônica. Lips e Duivenvoorden (1996), em um estudo sobre solos da região Amazônica colombiana, identificaram que os teores de nutrientes obtidos apresentavam relação direta com o material de origem dos solos e foram suficientes para diferenciar tipos de solos com a técnica da análise de componentes principais.

Já Moreira et al. (2009), usando técnicas de análise multivariada, identificaram que o manejo dado a Cambissolos na região de Benjamin Constant – AM estava alterando as propriedades químicas destes solos. Os autores identificaram que as variáveis relacionadas à fertilidade dos solos apresentavam maior poder de explicação para a variabilidade dos dados. Cambissolos submetidos a processo de queima, por exemplo, apresentaram maiores teores de nutrientes, separando assim de outros tipos de

manejo, como os solos para pastagem, que apresentaram menores teores de nutrientes e maiores valores de $m\%$, Al^{3+} e $H^+ + Al^{3+}$.

2.4.2 Mineralogia da fração argila e análise multivariada dos atributos químicos relacionados à mineralogia dos solos

A presença de minerais do tipo 2:1 como illita e outros expansivos (como vermiculita) nos Neossolos Flúvicos e Gleissolos reflete a carga de material sedimentar proveniente das regiões andinas. Guyot et al. (2007) apontam que as precipitações e a topografia das cadeias de montanhas andinas são suficientes para promover uma intensa erosão, com a qual uma enorme carga de sedimentos são transportados anualmente para a bacia Amazônica. Os autores afirmam ainda que nas áreas mais elevadas da região andina o intemperismo físico é mais atuante que o químico, promovendo a erosão de sedimentos recentes formados principalmente por illita, clorita e esmectita na fração argila. Segundo Martinelli et al. (1993), à medida que a carga de sedimentos que compõem os solos de várzea da região Amazônica se afasta da principal área fonte (a região Andina), ocorre a redução dos minerais illita e vermiculita e o aumento de caulinita.

A bacia Amazônica brasileira está imersa em um ambiente de intemperismo tropical. Entretanto, em virtude dos sedimentos provenientes dos escudos das Guianas e Brasil Central, ricos em caulinita, os solos de várzea ainda apresentam características de solos jovens, como demonstrado pela associação dos Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Cambissolos com as variáveis K_i e K_r na análise de componentes principais, no qual maiores valores para estes índices sugerem uma menor ação do intemperismo químico nos solos.

As inundações que ocorrem anualmente nas áreas de várzea no estado do Amazonas não propiciam condições necessárias para a formação de óxidos de ferro como hematita e goethita e isso é observado pela relação entre ferro de baixa cristalinidade e bem cristalizado (Fe_o/Fe_d) (Figuras 8 e 9). Segundo Schwertmann e Kämpf (1983), a relação Fe_o/Fe_d é um indicador seguro das formas de óxidos de ferro que ocorrem no ambiente, onde relações inferiores a 0,05 sugerem a predominância de óxidos como hematita e goethita, principais óxidos encontrados em solos de áreas não hidromórficas no Brasil. A relação média encontrada no presente estudo foi de 0,32 e 0,29 para os Neossolos Flúvicos e Gleissolos, respectivamente, sugerindo a presença de óxidos de menor cristalinidade, como lepidocrocita e/ou ferrihidrita nos solos. Nas áreas de várzea,

parte do ferro encontra-se como Fe^{2+} , apresentando maior solubilidade e sendo este sujeito a remoção perfil do solo. Quando presente no solo, o Fe^{2+} geralmente tende a se ligar à matéria orgânica, inibindo assim a formação de óxidos bem cristalizados (SCHWERTMANN, KÄMPF, 1983; LIMA et al., 2006).

Segundo Thompson e Ukrainczyk (2002), a mica da fração argila geralmente é identificada como ilita em solos e rochas sedimentares. A presença de ilita nos solos do estado do Amazonas é marcante, principalmente nos solos desenvolvidos de sedimentos mais recentes, como nos terraços fluviais, onde são encontradas as áreas de várzeas, e nas formações Solimões e Içá (LIMA et al., 2006; MARTINS et al., 2006; GUYOT et al., 2007; GUIMARÃES et al., 2013).

A presença de ilita em Cambissolos, Neossolos Flúvicos, Gleissolos e em algumas amostras de Argissolos e Plintossolos apresenta relação com o material de origem desses solos. Os Gleissolos e Neossolos Flúvicos recebem constantemente sedimentos andinos durante o período das cheias, sedimentos estes ricos em ilita (GUYOT et al., 2007). Já a presença de ilita em Cambissolos (amostras 29, 35, 37 e 40) e Plintossolos (amostras 66 e 67) pode ser considerada uma herança do material de origem (sedimentos das formações Solimões e Içá), bem como resultado do processo de intemperismo de micas presentes nas frações areia e silte (LIMA et al., 2006).

A ilita, além de encontrada em solos formados sobre material sedimentar, também foi identificada em Argissolos (amostras 32, 34 e 39) e Latossolos (amostras 10 e 18) formados sobre granitos, presentes nos Escudos das Guianas e Brasil Central. A ilita encontrada em solos sobre rochas ígneas pode ter sua gênese a partir do intemperismo de micas (muscovita ou biotita) e/ou feldspatos, minerais que são constituintes essenciais dos granitos (MUGLLER et al., 2007; BÉTARD et al., 2009). A presença de ilita em solos sobre granito na região sul do estado do Amazonas foi relatada por Campos et al. (2011) em estudos sobre mineralogia de Latossolos Vermelho-Amarelos e em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Os autores atribuem a presença do referido mineral à posição dos solos na paisagem (encosta), onde os processos erosivos podem expor materiais com menor grau intemperismo. Kitagawa e Moller (1979), em estudo sobre a mineralogia de diversos solos da região Amazônica, também encontraram traços de ilita na fração argila e associaram tal fato à grande estabilidade deste mineral, mesmo sob condições de intenso intemperismo que ocorre nesta região.

Nos Argissolos (amostras 34 e 39) e Latossolos (amostras 10 e 18) foi possível identificar também picos de minerais do tipo 2:1, possivelmente vermiculita com

hidróxi entrecamadas (VHE), como observado por Lima (2001), em Latossolos do Médio Amazonas, e por Kitagawa e Moller (1979), em amostras de Argissolos da região do Alto Rio Negro. As vermiculitas encontradas em solos podem ser formadas por alteração de micas e/ou podem ter sua gênese a partir de feldspatos (DOUGLAS, 1989; MALLA, 2002). Em condições de clima tropical, pode ocorrer deposição de polímeros hidróxi (principalmente de Al) nas entrecamadas das vermiculitas, formando assim as VHE. A presença dos polímeros nas entrecamadas concede maior estabilidade a este mineral, mesmo em condições de intemperismo químico agressivo, permitindo assim a sua presença juntamente com minerais de maior estabilidade, como a gibbsita (KER, RESENDE, 1990; AZEVEDO, VIDAL-TORRADO, 2009; PEREIRA et al., 2010; SHAW et al., 2010; BHATTACHARYYA et al., 2010; ARAUJO et al., 2014).

A caulinita foi o mineral encontrado em todas as amostras dos solos estudados e este mineral, no contexto do estado do Amazonas, pode ter sua gênese relacionada a três processos: (1) produto do intemperismo de minerais primários ou secundários, (2) neoformação e (3) herança do material de origem. A caulinita como produto de intemperismo de minerais primários ou secundários está relacionada principalmente com os solos formados sobre as rochas ígneas e metamórficas presentes nos Escudos das Guianas e Brasil Central (MELO et al., 2006; ORRUTÉA et al., 2012). Além disso, pode-se esperar que minerais primários e secundários (como a mica) presentes em solos formados sobre rochas sedimentares das formações Alter do Chão, Solimões e Içá também estejam sujeitos aos processos de intemperismo químico, transformando-se em caulinita.

Balan et al. (2007), usando técnicas como espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica e espectroscopia no infravermelho, identificaram mudanças nas características químicas e físicas de caulinitas em um perfil de Latossolo próximo de Manaus – AM. Em superfície, o mineral em questão apresentava características de uma caulinita mal cristalizada (quando comparado com amostras padrões e com a parte inferior do perfil de solo), de modo que, nesse caso, os autores sugerem a neoformação de caulinita a partir da dissolução de uma caulinita mais antiga. Além disso, os autores acrescentam que, apesar do processo de neoformação, cerca de 20 % da composição mineral do solo é formada por caulinitas herdadas do material de origem (caulinitas com maior cristalinidade) e 45 % são de caulinitas neoformadas ou de 2ª geração (com menor cristalinidade).

Os Latossolos (amostras 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12 e 13), Argissolos (amostras 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 33), Plintossolos (amostra 64) e a Terra Preta de Índio (amostra 68) apresentaram mineralogia com predomínio de caulinita (com traços de gibbsita, Figuras 14A, 15A e 19). Tais solos encontram-se principalmente sobre os materiais de origem mais antigos do estado do Amazonas, os sedimentos da Formação Alter do Chão (65,5 Ma) e as rochas ígneas e metamórficas presentes nos Escudos das Guianas (2,03 - 1,55 Ga) e Brasil Central (1,81 - 1,55 Ga). O predomínio de caulinita nestes solos pode também ser evidenciado com base nos índices Ki (médias de 1,95 e 1,76 em superfície e subsuperfície, respectivamente) e Kr (médias de 0,85 e 0,81 para as camadas superficial e subsuperficial, respectivamente), índices estes usados, a princípio, para definir o caráter caulínítico ou oxídico de Latossolos, mas que posteriormente também foram adotados para Argissolos e Cambissolos (RESENDE, SANTANA, 1988; EMBRAPA, 2013).

Solos com predomínio de caulinita no estado do Amazonas também foram relatados por Chauvel (1981), Lima (2001) e Marques et al. (2010). Segundo Lucas et al. (1993), existe uma relação entre a atividade biológica e a composição mineral do solo, sendo a ciclagem de elementos químicos aportados pela vegetação um fator relevante na manutenção da caulinita em áreas da Floresta Amazônica. Os autores acrescentam que a lixiviação de silício e alumínio, oriundos da decomposição do material vegetal, seria de 5,65 e 0,65 $\mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente, ou seja, uma relação de 8:1. Tal relação é suficiente para promover uma supersaturação de silício na superfície do solo, permitindo assim a estabilização da caulinita, ou até mesmo propiciando condições para a neoformação de caulinita, como proposto por Balan et al. (2007). Essa supersaturação de silício em superfície atuaria como um efeito anti-gibbsítico, tendo em vista que a relação Si/Al favorece a formação de caulinita, e isso pode ser evidenciado pela ausência de picos de grande intensidade de gibbsita.

De fato, a explicação dada por Lucas et al. (1993) para a maior ocorrência de solos caulíníticos sobre os sedimentos da Formação Alter do Chão também parece razoável para explicar a ausência de picos intensos de gibbsita nas amostras de Latossolos e Argissolos formados sobre a mesma Formação no presente estudo. No entanto, outros solos formados sobre a Floresta Amazônica apresentam picos de grande intensidade para a gibbsita. Tal fato sugere, portanto, que o modelo proposto por Lucas et al. (1993) seja melhor aplicado para os solos desenvolvidos sobre os sedimentos da Formação Alter do Chão, sendo o mesmo menos usual para os solos formados sobre as rochas ígneas ou metamórficas dos Escudos das Guianas e Brasil Central.

Os Latossolos (amostras 2, 8, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20), Argissolos (amostras 31, 32, 34, 38 e 39) e as Terras Pretas de Índio (amostras 69, 70 e 71) apresentaram os picos de maior intensidade para gibbsita (Figuras 14B, 15B e 19). Os índices K_i (médias de 1,28 e 0,90 para as camadas superficial e subsuperficial, respectivamente) e K_r (médias de 0,90 e 0,39 em superfície e subsuperfície, respectivamente) dos solos evidenciam uma maior participação da gibbsita na composição mineralógica da fração argila dos mesmos, mas não o suficiente para caracterizar tais amostras como solos gibbsíticos (com exceção das amostras 11, 14, 15, 19, 20, 69 e 71, com base nos dados de K_i de subsuperfície). Apesar de algumas amostras citadas não apresentarem caráter gibbsítico, as mesmas serão estudadas em um único conjunto, tendo em vista a presença de picos de alta intensidade de gibbsita e também por serem solos em estágio avançado de intemperismo, diferenciando-se assim dos demais solos do estado do Amazonas.

A presença de gibbsita também foi verificada por Campos et al. (2011), em Latossolos (K_i entre 0,3 e 0,9) e Argissolos (K_i entre 0,7 e 0,9) desenvolvidos sobre granitos na região sul do estado do Amazonas, e por Kitagawa (1980), em Latossolos também desenvolvidos a partir do granito em São Gabriel da Cachoeira. Mafra et al. (2002), conduzindo estudos de pedogênese numa sequência Latossolo – Espodosolo sobre granitos na região do Alto Rio Negro, também identificaram o predomínio de gibbsita na fração argila dos Latossolos e associaram tal fato a uma drenagem rápida do solo e uma baixa atividade de H_4SiO_2 .

As amostras que apresentaram picos de alta intensidade para gibbsita correspondem aos solos formados sobre granitos e materiais vulcânicos, localizados nos Escudos das Guianas e Brasil Central (com exceção da amostra 2, pertencente à classe dos Latossolos, que está sobre os sedimentos da Formação Alter do Chão). Furian et al. (2002), em um estudo sobre a dinâmica de formação de gibbsita e caulinita em Latossolos desenvolvidos sobre granito no sudeste brasileiro, identificaram a passagem direta de minerais primários para gibbsita. Nesse processo, o Al liberado pelo intemperismo tende a precipitar na forma de cristais de $Al(OH)_3$, como gibbsita, enquanto o Si (H_4SiO_2) tende a ser removido do perfil de alteração. Outra rota para a formação de gibbsita envolve a remoção gradual de sílica, com a seguinte sequência de intemperismo: minerais primários > minerais secundários (2:1) > minerais secundários (1:1) > gibbsita (HSU, 1989).

Os dados apresentados no presente trabalho não permitem identificar qual das rotas acima foi mais relevante ou se a atuação de ambas, em períodos distintos, foi

responsável pela formação de gibbsita nos solos do estado do Amazonas. Assim, estudos de gênese do solo com o uso de técnicas modernas podem auxiliar na compreensão da formação desse mineral, bem como entender melhor o ambiente climático de formação da gibbsita nesses solos.

Os teores de ferro extraídos pelo ataque sulfúrico (Fe_2O_3 ; média geral de 53 e 70 g kg^{-1} em superfície e subsuperfície, respectivamente) e os extraídos no DCB (Fe_d ; média geral de 47 e 43 g kg^{-1} em superfície e subsuperfície, respectivamente) foram baixos. Sobre o intemperismo de minerais primários, sabe-se que a liberação de Fe para o ambiente permite a formação de óxidos (óxidos e oxi-hidróxidos). Assim, as médias encontradas refletem, de maneira geral, solos formados sobre material sedimentar, geralmente desprovido de minerais primários ricos em Fe (LIMA, 2001). Os maiores teores de Fe encontrados neste estudo, tanto em superfície quanto em subsuperfície, são encontrados nos solos formados sobre as rochas ígneas e metamórficas dos Escudos das Guianas e Brasil Central.

Em solos com maior grau de intemperismo, a relação $\text{Fe}_d/\text{Fe}_{AS}$ tende a ser próxima de 1, sugerindo que o ferro anteriormente presente nas estruturas cristalinas de minerais primários e secundários esteja atualmente sob a forma de óxidos (ex: goethita e hematita). Tal fato é decorrente dos processos de intemperismo aos quais os solos foram submetidos e, no presente estudo, isto foi observado na camada superficial dos solos.

No entanto, em subsuperfície, essa relação inferior a 1 em parte das amostras de Latossolos, Argissolos e de outros solos pode sugerir a presença de ferro ligado a argilominerais, como caulinita e vermiculita com hidróxi-entre-camadas, e/ou a dissolução por ácido sulfúrico de concreções ferruginosas presentes nas frações silte e areia, que são comuns na região amazônica (BALAN et al., 2007; LIMA, 2001).

Nos Latossolos, uma relação $\text{Fe}_d/\text{Fe}_{AS}$ superior a 1 foi encontrada nas amostras 7, 14, 16, 18, 19 e 20, o que parece estar correlacionado com os menores teores de argila da fração TFSA. De fato, verificou-se uma correlação negativa entre a relação $\text{Fe}_d/\text{Fe}_{AS}$ e os teores de argila nas profundidades de 0 – 20 ($r = -0,842$, $p < 0,05$, $n = 20$) e 80 – 100 cm ($r = -0,857$, $p < 0,05$, $n = 20$) na classe dos Latossolos, sugerindo uma menor participação dos óxidos de ferro na fração TFSA (extraída com ácido sulfúrico), enquanto que, na fração argila, ocorre uma maior participação destes óxidos (extraída com ditionito-citrato). Estes valores elevados para a relação $\text{Fe}_d/\text{Fe}_{AS}$ também sugerem um maior intemperismo, o que é corroborado com a presença de gibbsita e uma menor relação K_i para estes solos.

A substituição isomórfica de Fe por Al (SI) observada na camada superficial dos solos do estado do Amazonas foi inferior ao limite máximo estabelecido para goethita sintéticas (33 cmol mol^{-1}) (SCHULZE, 1984), bem como inferior aos valores encontrados por Lima (2001) (entre 27 e 29 cmol mol^{-1} para Latossolos da região do Médio Amazonas) e por Fritsch et al. (2005) (33 cmol mol^{-1} em um Latossolo próximo da região de Manaus).

Estes valores para SI encontrados na camada superficial dos solos estão relacionados com a matéria orgânica, que apresenta capacidade de complexação com o Al liberado durante o processo de intemperismo. Tal fato limita a participação do Al durante a fase de formação dos óxidos de ferro e, além disso, a matéria orgânica pode reduzir a cristalização de goethitas no solo, resultando em menores valores de substituição isomórfica de Fe por Al (FITZPATRICK, SCHWERTMANN, 1982).

Em subsuperfície, grande parte das amostras dos Latossolos, Argissolos e das TPI apresentaram valores de SI superiores a 33 cmol mol^{-1} , estando bem acima do limite máximo de substituição de Fe por Al em goethitas (SCHULZE, 1984). Segundo Fitzpatrick e Schwertmann (1984), Fontes e Weed (1991) e Fontes (1995), valores de SI superiores a 33 cmol mol^{-1} podem sugerir a participação de outras fontes de Al extraídas por ditionito-citrato, não refletindo o Al relacionado à SI nos óxidos de ferro (por exemplo: o Al associado aos óxidos de alumínio e a minerais do tipo 2:1 com hidróxi entrecamadas, fato este observado no presente estudo).

Os valores encontrados neste trabalho refletem o ambiente no qual parte dos óxidos de ferro (neste caso, a goethita) foi formada, evidenciando um ambiente com intensa lixiviação de bases, ácido, com uma atividade e disponibilidade de Al elevada, suficiente para promover o máximo de SI em goethitas (FITZPATRICK, SCHWERTMANN, 1984; FONTES, WEED, 1991).

A predominância de óxidos de boa cristalinidade ($\text{Fe}_o/\text{Fe}_d < 0,05$) nos solos de terra firme é um indicativo seguro acerca dos tipos de óxidos presentes nesses solos, nesse caso, hematita e/ou goethita, como demonstrado por Schwertmann e Kämpf (1983). A presença desses dois minerais em solos do estado do Amazonas também foi observada por Kitagawa e Moller (1979), Lima (2001), Marques et al. (2010) e Campos et al. (2011) e Aquino et al. (2016).

No presente estudo, a presença de goethita em parte dos Latossolos, Argissolos e das Terras Pretas de Índio (principalmente nos solos desenvolvidos sobre a Formação Alter do Chão) está relacionada com a destruição de crostas lateríticas na região. Segundo Fritsch et al. (2002), processos de redução em microescala durante a

época chuvosa propiciam a destruição das crostas lateríticas, com a transformação da hematita em goethita, processo este observado nos topos de perfis lateríticos da Formação Alter do Chão. Quando as condições redutoras não são suficientes para promover toda essa transformação, parte do perfil de solo (antigo perfil laterítico) tende a apresentar cores avermelhadas, evidenciando a presença de hematita.

Os picos mais intensos de hematita foram observados principalmente nos Latossolos (amostras 8, 11, 12, 13, 15 e 20) e Argissolos (amostras 31, 32, 33, 34, 38 e 39), desenvolvidos a partir de rochas ígneas e metamórficas presentes nos Escudos das Guianas e Brasil Central. As condições de formação de hematita nos solos do estado do Amazonas talvez estejam relacionadas a um clima mais quente e com menor intensidade de chuvas, diferente do atual, conforme observado por Cordeiro et al. (2011). Essas condições, aliadas a baixos teores de matéria orgânica e menor umidade, são favoráveis à gênese da hematita sobre a goethita (KAMPF, SCHEWERTMANN, 1983).

2.5 CONCLUSÕES

Os solos do estado do Amazonas estão distribuídos principalmente em dois tipos de ambiente, os de várzea e de terra firme, que apresentam características distintas do ponto de vista químico. Os solos de várzea, provenientes de sedimentos andinos, apresentam elevada fertilidade natural e tal condição propicia seu uso agrícola entre os períodos das cheias na região. Já os solos de terra firme apresentam uma menor fertilidade e seus teores de nutrientes têm estreita relação com a decomposição de matéria orgânica no solo.

Entre os solos do ambiente de terra firme, aqueles formados a partir dos sedimentos da Formação Solimões, apresentam uma maior fertilidade química, e diferenciam-se dos demais solos das Formações Iça e Alter do Chão, bem como dos solos encontrados nos escudos das Guianas e Brasil-Central.

Os diversos solos do estado apresentam uma mineralogia contrastante, o que está relacionado ao material de origem. Os solos formados sobre material de origem sedimentar mais recente, como a Formação Solimões, apresentam mineralogia do tipo 2:1, com minerais expansivos, e maior fertilidade natural. Já os solos formados sobre as rochas ígneas e metamórficas dos Escudos das Guianas e Brasil Central apresentam mineralogia aproximadamente do tipo gibbsítica e uma menor fertilidade do solo.

REFERÊNCIAS

AQUINO, R. E., MARQUEZ JUNIOR, J., CAMPOS, M. C. C., OLIVEIRA, I. A., BAHIA, A. S. R. S., SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, Southern Amazonas. **Geoderma**, v. 262, p. 35 – 44, 2016.

ARAÚJO, M. A., PEDROSO, A. V., AMARAL, D. C., ZINN, Y. L. Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 11 – 25, 2014.

AZEVEDO, A. C., VIDAL-TORRADO, P. Esmectita, vermiculita, minerais com hidróxi-entrecamadas e clorita. In: M ELO, V. F., ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia. Parte I – Conceitos básicos**. Viçosa – MG, Brasil. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 381 -426, 2009.

BALAN, E., FRITSH, E., ALLARD, T., CALAS, G. Inheritance vs neoformation of kaolinite during lateritic soil formation: a case study in the middle amazon basin. **Clays and clay minerals**, v. 55, p. 253 – 259, 2007.

BÉTARD, F., CANER, L., GUNNELL, Y., BOURGEON, G. Illite neoformation in plagioclase during weathering: evidence from semi-arid Northeast Brazil. **Geoderma**, v. 152, p. 53 – 62, 2009.

BHATTACHARYYA, T., PAL, D. K., SRIVASTAVA, P. Formation of gibbsite in the presence of 2:1 minerals: an example from Ultisols of northeast India. **Clays minerals**, v. 35, p. 827 – 840, 2000.

BOTSCHEK, J., FERRAZ, J., JAHNEL, M., SKWRONEK, A. Soil chemical properties of a toposequence under primary rain forest in the Itacoatiara vicinity (Amazonas, Brazil). **Geoderma**, v. 72, p. 119 – 132, 1996.

BRAVARD, S., RIGHI, D. Characteristics of clays in an oxisol-spodosol toposequence in Amazonia (Brazil). **Clays minerals**, v. 23, p. 279 – 289, 1988.

BRINKMANN, W. L. F. System propulsion of an Amazonian Lowland Forest: an outline. **GeoJournal**, v. 19, p. 369 – 380, 1989.

CAMPOS, M. C. C., RIBEIRO, M. R., SOUZA JUNIOR, V. S., RIBEIRO FILHO, M. R., SOUZA, R. V. C. C. Relações solo-paisagem em uma toposequência sobre substrato granítico em Santo Antônio do Matupi, Manicoré (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 13 – 23, 2011.

CAMPOS, M. C. C., RIBEIRO, M. R., SOUZA JUNIOR, V. S., RIBEIRO FILHO, M. R., ALMEIDA, M. C. Relações solo-superfície geomórficas em uma toposequência várzea-terra firme na região de Humaitá. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 325 – 336, 2012.

CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & RONDÓN, M.A. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: LAL,

R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C.E.P (Org). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York, Haworth, 2006. p. 245-266.

CHAUVEL, A. Contribuição para o estudo da evolução dos Latossolos amarelos, distróficos, argilosos na borda do platô, na região de Manaus: mecanismos da gibbsitização. **Acta Amazônica**, v. 11, p. 227 – 245, 1981.

COELHO, M. R., FIDALGO, E. C.C., ARAÚJO, F. O., SANTOS, H. G., SANTOS, M. L. M., PÉREZ, D. V., MOREIRA, F. M. S. **Levantamento pedológico de uma área-piloto relacionada ao projeto BiosBrasil** (Conservation and sustainable management of below-ground biodiversity: phase I), município de Benjamin Constant (AM): Janele 6. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 68, EMBRAPA, 2005.

CORDEIRO, R. C., TURCQ, B., SIFEDDINE, A., LACERDA, L. D., SILVA FILHO, E. V., GUEIROS, B., POTTY, Y. P., SANTELLI, R. E., PÁDUA, E. O., PATCHINELAM, S. R. Biogeochemical indicators of environmental changes from 50 Ka to 10 Ka in a humid region of the Brazilian Amazon. **Palaeogeography, paleoclimatology, palaeoecology**, v. 299, p. 426 – 436, 2011.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado do Amazonas**. 2006. http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_amazonas.pdf Acesso em Junho, 2016.

DANTAS, M. E.; MAIA, M. A. M. Compartimentação geomorfológica. In: MAIA, M.A.M.; MARMOS, J.L., eds. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus, CPRM, 2010. p.17-26.

DEMATTÊ, J. L. I., DEMATTÊ, J. A. M. Comparisons of chemical properties of forest (Amazon Region) and savanna soils (Central Region) of Brazil. **Scientia Agrícola**, v. 50, n. 2, p. 272 – 286, 1993.

DOUGLAS, L. A. Vermiculites. In: DIXON, J. B., WEED, S.B. (Eds.). **Minerals in Soil Environments**, 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, WI. pp 635–674., 1989.

DUBROEUCQ, D., VOLKOFF, B. From Oxisols to Spodosols and Histosols: Evolution of the soil mantles in the Rio Negro Basin (Amazonia). **Catena**, v. 32, p. 245 – 280, 1998.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise do solo**. 2º ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, Rio de Janeiro. 2011. 230 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. Brasília, DF; 2013.

FITZPATRICK, R. W., SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite – na indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, v. 27, p. 335 – 347, 1982.

FONTES, M. P.F., WEED, S. B. Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: I. Mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 1143 – 1149, 1991.

FONTES, M. P. F. Letter to Editor - Comments on "The effects of soil properties on the differential phosphate sorption by semiarid soils from northeast Brazil". **Soil Science**, v. 159, p. 74 – 75, 1995.

FRITSCH, E., MONTES-LAUAR, C. R., BOULET, R., MELFI, A. J., BALAN, E., MAGAT, P. Lateritic and redoximorphic features in a faulted landscape near Manaus, Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 53, p. 203 – 217, 2002.

FRITSH, E., MORIN, G., BEDIDI, A., BONNIN, D., BALAN, E., CAQUINEAU, S., CALAS, G. Transformation of haematite and al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferralitic clay soil profile of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). **European Journal of Soil Science**, v. 56, p. 575 – 588, 2005.

FURIAN, S., BARBIÉRO, L., BOULET, R., CURMI, P., GRIMALDI, M., GRIMALDI, C. Distribution and dynamics of gibbsite and kaolinite and kaolinite in an oxisol of Serra do Mar, southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 106, p. 83 – 100, 2002.

GARCIA, C. H. P., LIMA, H. N., SILVA, F. W. R., NEVES JUNIOR, A. F., TEIXEIRA, W. G., MACEDO, R. S., TAVARES, S. G. Chemical properties and mineralogy of soils with plinthite and petroplinthite in Iranduba (AM), Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 936 – 946, 2013.

GLASER, B., BIRK, J. J. 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (Terra Preta do Índio). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 82, p. 39 – 51.

GOMES, A. S. **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade de solos da bacia do Solimões, sob floresta tropical Amazônica**. 2014. 63 folhas. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Rio de Janeiro, 2014.

GUIMARÃES, S. T., LIMA, H. N., TEIXEIRA, W. G., NEVES JÚNIOR, A. F., SILVA, F. W. R., MACEDO, R. S., SOUZA, K. W. Caracterização e classificação de gleissolos da várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317 – 326, 2013.

GUYOT, J. L., JOUANNEAU, J. M., SOARES, L., BOAVENTURA, G. R., MAILET, N., LAGANE, C. Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. **Catena**, v. 71, p. 340-356, 2007.

HORBE, A. M. C., HORBE, M. A., SUGUIO, K. Tropical Spodosols in northeastern Amazonas State, Brazil. **Geoderma**, v. 119, p. 55 – 68, 2004.

HORBE, A. M. C., PAIVA, M. R. P., MOTTA, M. B., HORBE, M. A. Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari – AM. **Acta Amazônica**, v. 37, p. 81 – 90, 2007.

HSU, P.H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. **Minerals in soil environments**, 331-378, 1989.

IBGE. **Geoestatísticas de Recursos Naturais da Amazônia Legal**. 2003. Estudos e Pesquisas, Informações Geográficas no 8. Rio de Janeiro, R.J. 2011.

IBGE. Perfil do Estado do Amazonas. 2016. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/Estadosat/perfil.php?sigla=am>.> Acesso em: 21 jan. 2016.

IBGE, 2010b. **Mapa de Vegetação do Estado do Amazonas**.
ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/vegetacao/unidades_federacao/am_vegetacao.pdf Acesso em 19 de Maio de 2016.

IBGE, 2010a. **Mapa de Solos do Estado do Amazonas**.
ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/pedologia/unidades_federacao/am_pedologia.pdf Acesso em 28 de Junho de 2016

ISHIDA, D. A., MONTES, C. R., LUCAS, Y., PEREIRA, J. R., MERDY, P., MELFI, A. J. Genetic relationships between ferralsols, podzols, and White kaolin in Amazonia. **European Journal of Soil Science**, v. 65, p. 706 – 717, 2014.

KAMPF, N., SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, v. 29, p. 27 – 39, 1983.

KER, J. C., RESENDE, M. Caracterização química e mineralógica de solos brunos subtropicais do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 215 – 225, 1990.

KITAGAWA, Y., MOLLER, M. R. F. Clay mineralogy of some typical soils in the Brazilian Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 14, p. 201 – 228, 1979.

KITAGAWA, Y. Gibbsite in two Amazon soils. **Clay Science**, v. 5, p. 277 – 281, 1980.

LIMA, H.N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 176p. (Tese de Doutorado).

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 topossequência da bacia sedimentar do alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 59 – 68, 2006.

LIMA, H. N., SCHAEFER, C. E. R., MELLO, J. W. V., GILKES, R. J., KER, J. C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, p. 1 – 17, 2002.

LIPS, J., DUIVENVOORDEN, J. F. Regional patterns of well drained upland soil differentiation in the middle Caquetá basin of Colombian Amazonia. **Geoderma**, v. 72, p. 219 – 257, 1996.

LUCAS, Y., LUIZÃO, F. J., CHAUVEL, A., ROUILLER, J., NAHON, D. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. **Science**, v. 260, p. 521 – 523, 1993.

LUCAS, Y., MONTES, C. R., MOUNIER, S., CAZALET, M. L., ISHIDA, D., ACHARD, R., GARNIER, C., COULOMB, B., MELFI, A. J. Biogeochemistry of an Amazonian podzol-ferralsol soil system with white kaolin. **Biogeosciences**, v. 9, p. 3705-3720, 2012.

MAFRA, A. L., MIKLOS A. A. W., VOLKOFF, B., MELFI, A. J. Pedogênese numa sequência Latossolo-Espodosolo na região do alto Rio Negro, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 381 – 394, 2002.

MALLA, P. B. Vermiculites. In: DIXON, J. B., SCHULZE, D. (Eds.). **Soil Mineralogy with Environmental Applications**, 501 – 529, 2002.

MARTINS, G. C., FERREIRA, M. M., CURI, N., VITORINO, A. C. T., SILVA, M. L. N. Campos nativos e matas adjacentes da região de Humaitá (AM): Atributos diferenciais dos solos. **Ciência e agrotecnologia**, v. 30, n. 2, p. 221 – 227, 2006.

MARQUES, J. D. O., TEIXEIRA, W. G., REIS, A. M., CRUZ JUNIOR, O. F., BATISTA, S. M., AFONSO, M. A. C. B. Atributos químicos, físicos-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. **Acta Amazônica**, v. 40, p. 1 – 12, 2010.

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

MARTINELLI, L. A., VICTORIA, R. L., DEMATTÊ, J. L. I., RICHEY, J. E., DEVOL, A. H. Chemical and mineralogical composition of Amazon River floodplain sediments, Brazil. **Applied Geochemistry**, v. 8, p. 391 – 402, 1993.

MELO, V. F., SCHAEFER, C. E. G. R., FONTES, L. E. F., CHAGAS, A. C., LEMOS JUNIOR, 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1039 – 1050, 2006.

MCKEAGUE, J. A., DAY, J. H. Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canada Journal Soil Science**, v. 46, p. 13-22, 1966.

MEHRA, O. P., JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Mineral**, v. 7, p. 317 – 327, 1960.

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. **Science Total Environment**, v. 408, p. 349 – 355, 2009.

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

MUGGLER, C., BUURMAN, P., DOESBURG, J. D. J. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. Mineralogy. **Geoderma**, v. 138, p. 39 – 48, 2007.

OLIVEIRA, I. A., CAMPOS, M. C. C., FREITAS, L., SOARES, M. D. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**, v. 45, p. 1 – 12, 2015.

ORRUTÉA, A. G., MELO, V. 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 Amazônica**, v. 42, n. 2, p. 461 – 470, 2012.

PEREIRA, T. T. C., KER, J. C., SCHAEFER, C. E. G. R., BARROS, N. B., NEVES, J. C. L., ALMEIDA, C. C. Gênese de Latossolos e Cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí – Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1283 – 1295, 2010.

QUESADA, A. C. LLOYD, J., ANDERSON, L. O., FYLLAS, N. M., SCHWARZ, M., CZIMCZIK. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, p. 1415 – 1440, 2011.

RAMMIG, A.; JUPP, T.; THOMICKE, K.; TIETJEN, B.; HEINKE, J.; OSBERG, S.; LUCHT, W.; CRAMER, W.; COX, P. Estimating the risk of Amazonian forest dieback. **New Phytologist**, v. 187, p. 694 – 706, 2010.

REIS, N. J.; ALMEIDA, M. E. Arcabouço Geológico. In: MAIA, M.A.M.; MARMOS, J.L., eds. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus, CPRM, 2010. p.17-26.

RESENDE, M. SANTANA, D.P. Uso das relações K_i e K_r na estimativa da mineralogia para a classificação dos Latossolos. In: **Reunião de classificação, correlação de solos e interpretação de aptidão agrícola**, 3. Rio de Janeiro, 1988. Anais. Rio de Janeiro, Embrapa – SNLCS, SBCS, 1988. p.225-232.

RODRIGUES, T. E., OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. O., SANTOS, P. L., SILVA, P. R. O. **Caracterização e classificação dos solos do município de Presidente Figueiredo, Estado do Amazonas**. Documentos n° 123, EMBRAPA, 2001.

SANTOS, L. A. C., CAMPOS, M. C. C., AQUINO, R. E., BERGAMIN, A. C., SILVA, D. M. P., MARQUES JÚNIOR, J., FRANÇA, A. B. C. Caracterização de Terras Pretas Arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 825 – 826, 2013.

SCHULZE, D. G. The influence of aluminum on iron oxides. VIII. Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. **Clays and clays minerals**, v. 32, p. 36 – 44, 1984.

SCHWERTAMNN, U., KAMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 251 – 255, 1983.

SHAW, J. N., HAJEK, B. F., BECK, J. M. Highly weathered mineralogy of select soils from Southeastern U.S Coastal Plain and Piedmont landscapes. **Geoderma**, v. 154, p. 447 – 456, 2010.

SILVA, F. W. R., LIMA, H. N., TEIXEIRA, W. G., MOTTA, M. B., SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 673 – 681, 2011.

SIOLI, H. IRION, G. Introduction: History of the discovery of the Amazon and of research of Amazonian waters and landscapes. In: **The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**. SIOLI, H (Ed). Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, 1984. p.1-13.

SOMBROEK, W.G. **Amazon soils; a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region**. Wageningen, Centre for agricultural publications and documentation, 1966. 262p.

TEIXEIRA, W.G.; ARRUDA, W.; SHINZATO, E.; MACEDO, R.S.; MARTINS, G.C.; LIMA, H.N. & RODRIGUES, T.E. Solos do Estado do Amazonas. In: MAIA, M.A.M.; MARMOS, J.L., Eds. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus, CPRM, 2010. p.71-86.

THOMPSON, M.L., UKRAINCZYK, L. Micas. In: DIXON, J.B. & SCHULZE, D.G. **Soil mineralogy with environment applications**. Madison, 2002. p.431-461. (SSSA Book Series, 7)

VIEIRA, L. S., SANTOS, P.C.T.C. 1987. **Amazônia seus solos e outros recursos naturais**. Ed. Agronômica Ceres. São Paulo. 416 pp.

VITOUSEK, P. M., SANFORD JR, R. L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 17, p. 137 – 167, 1986.

3 **CAPITULO 2 - METAIS PESADOS E VALORES DE REFERÊNCIA PARA SOLOS DO AMBIENTE AMAZÔNICO (AMAZONAS – BRASIL)**

RESUMO

A Amazônia é uma importante região do Brasil e abriga a maior floresta equatorial úmida do mundo, a Floresta Amazônica, que apresenta relevância econômica e social para a região. Práticas relacionadas à atividade humana (ex: desmatamento, queimadas, pecuária, plantio de soja, expansão urbana e industrial) têm contribuído para a redução desta floresta. Tais práticas são responsáveis pela emissão de substâncias orgânicas e inorgânicas no meio, dentre elas os metais pesados, que são encontrados naturalmente no ambiente e podem ter seus teores influenciados por atividades antrópicas. Nesse contexto, a determinação de Valores de Referência de Qualidade (VRQ's) para metais pesados em solos visa distinguir os teores naturais de metais dos teores de origem antrópica, contribuindo para a fundamentação de ações de monitoramento e fortalecimento de políticas públicas de cunho ambiental, visando a proteção dos solos e de suas funções. O presente estudo teve como objetivo determinar os teores naturais de metais pesados em solos do estado do Amazonas – Brasil, visando estabelecer seus respectivos VRQ's. Amostras de 71 solos foram usadas para a determinação dos teores naturais de metais, que foram extraídos em meio ácido (HCl + HNO₃). Os resultados indicaram que os solos do estado do Amazonas apresentam teores de metais inferiores aos de solos de outras partes do Brasil e do mundo. Os maiores teores de metais foram obtidos em Latossolos e Argissolos, estando algumas amostras de solos pertencentes a essas classes associadas a rochas ígneas ou metamórficas. Já os teores mais baixos foram observados na classe dos Espodossolos e nos solos com maior teor de areia. O uso da análise multivariada possibilitou a identificação de dois grupos de metais nesses solos, um com metais de menor mobilidade (Cr, V, Fe, Ti, Zr e Al) e outro com metais considerados de maior mobilidade (Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Cu e Mn). Os VRQ's foram calculados de acordo com a resolução N° 420/2009 do CONAMA e, de maneira geral, apresentaram valores inferiores aos de VRQ's estabelecidos para solos de outros estados brasileiros. Um aspecto importante é que foi observada uma diferenciação quanto aos teores de metais entre os solos de terra firme e de várzea, implicando assim na necessidade de formulação de dois VRQ's por metal para os solos estudados.

Palavras-chave: Metais pesados; solos de terra firme; solos de várzea; Amazônia

HEAVY METALS AND REFERENCE VALUES FOR SOILS IN THE AMAZONIAN ENVIRONMENT (AMAZONAS - BRAZIL)

ABSTRACT

Amazon is an important region of Brazil and is home to the world's largest rainforest equatorial forest, the Amazon Rainforest, which has economic and social relevance for the region. Practices related to human activity (eg deforestation, burning, cattle raising, soybean planting, urban and industrial expansion) have contributed to the reduction of this forest. Such practices are responsible for the emission of organic and inorganic substances in the environment, among them the heavy metals, which are naturally found in the environment and may have their contents influenced by anthropic activities. In this context, determination of Quality Reference Values (QRVs) for heavy metals in soils aims to distinguish the natural levels of metals from the levels of anthropogenic origin, contributing to the foundation of actions to monitor and strengthen public policies of an environmental nature, aiming at the protection of soils and their functions. This study had as objective to determine the natural contents of heavy metals in soils of the state of Amazonas - Brazil, aiming to establish their respective QRVs. Samples of 71 soils were used for the determination of the natural metals contents, which were extracted in acid medium (HCl + HNO₃). Results indicated that the soils of the state of Amazonas present lower levels of metals than the soils of other parts of Brazil and the world. Highest metals contents were obtained in Oxisols and Ultisols, with some soil samples belonging to these classes associated with igneous or metamorphic rocks. Lowest levels were observed in the class of Spodosols and in soils with higher contents sand. Multivariate analysis made it possible to identify two groups of metals in these soils, one with metals of lower mobility (Cr, V, Fe, Ti, Zr and Al) and another with metals considered to be more mobile (Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Cu and Mn). QRVs were calculated according to resolution No. 420/2009 of CONAMA and, in general, has lower values than those of QRVs established for soils of other Brazilian states. An important aspect is that a differentiation was observed regarding the metal content between the terra firme and várzea soils, thus implying the need to formulate two QRVs per metal for the soils studied.

Keywords: Heavy metals; Terra firme soils; Várzea soils; Amazonian

3.1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é o bioma de maior área no território brasileiro, ocupando cerca de 4.196.943 km², e abrange a maior floresta tropical do planeta (3.289.828 km² de floresta do tipo ombrófila) (IBGE, 2011). Além disso, possui a maior bacia hidrográfica (6,1 10⁶ km² de extensão) e um dos maiores rios do mundo, o rio Amazonas (GUYOT et al., 2007). A Floresta Amazônica estoca aproximadamente 93 ± 23 Pg de carbono na forma de biomassa e tem potencial de sequestro de carbono da ordem de 421 a 470 Tg ano⁻¹ (CERRI et al., 2006; RAMMING et al., 2010), o que é relevante nos dias de hoje, onde se avalia cada vez mais a capacidade que uma determinada área tem de fixar e estocar carbono.

No entanto, toda essa abundância de recursos naturais pode ser comprometida quando submetida a intervenções que alterem o seu estado de equilíbrio e isso ocorre principalmente em decorrência de atividades antrópicas. Atualmente, o desmatamento é uma das principais práticas relacionadas à degradação deste bioma, sendo uma atividade de grande impacto e que é agravada pela venda ilegal de madeira e pela expansão de áreas agrícolas destinadas à pastagem e ao plantio de soja. Além disso, a expansão urbana e industrial das últimas décadas na região tem contribuído para a degradação do ambiente em questão (FERREIRA, SALATI, 2005; FEARNSTIDE, 2005).

Nesse contexto, sabe-se que avanços no crescimento industrial, urbano e agrícola contribuem para o aumento da concentração de compostos orgânicos e inorgânicos no ar, na água e no solo (VOUTSA, SAMARA, 2002; HERNANDEZ et al., 2003; LI et al., 2013; STANKOVIC et al., 2014), podendo ocasionar situações de risco ambiental. Dentre os diversos tipos de compostos originados de atividades antrópicas, os de natureza inorgânica, mais especificamente os metais pesados, recebem atenção especial. Estes elementos não sofrem degradação biológica e química, apresentam a propriedade de se acumular no ambiente, podendo ser incorporados à cadeia alimentar com maior intensidade (KIRPICHCHIKOVA et al., 2006; WUANA, OKIEIMEN, 2011).

A distribuição de metais no ambiente é controlada principalmente por fatores de ordem natural (geologia, intemperismo, tipo de solo, teor de argila, matéria orgânica, pH, dentre outros) e, em segundo plano, por fatores antropogênicos (atividades industriais, minas de rejeito, queima de combustíveis fósseis, aplicação de fertilizantes,

pesticidas e lodos de esgotos, além de derrames de indústrias petroquímicas, resíduos das queimas de carvões e outros) (WEI, YANG, 2010; WUANA, OKIEIMEN, 2011).

Pesquisas relacionadas à determinação dos teores naturais de metais pesados em solos são de grande importância para a definição de estratégias que tenham como objetivo avaliar solos contaminados visando a proteção e o monitoramento não só dos solos, mas do ambiente como um todo. Tais iniciativas assumem, portanto, um caráter relevante na elaboração de políticas públicas de cunho ambiental (SALMINEN, TARVAINEN, 1997; CHEN et al., 1999; BRUS et al., 2009; TENG et al., 2009; SANTOS, ALLEONI, 2013; STANKOVIC et al., 2014).

Assim, a quantificação dos teores naturais de metais pesados nos solos é a base para a determinação dos Valores de Referência de Qualidade (VRQ's) no Brasil, parâmetros estes utilizados na distinção entre teores naturais de metais e possíveis casos de contaminação em solos (CONAMA, 2009). O estabelecimento dos VRQ's tem contribuído para o fortalecimento da política de proteção dos solos brasileiros, garantindo, assim, a funcionalidade dos mesmos (PAYE et al., 2010; SANTOS, ALLEONI, 2013; PRESTON et al., 2014; BIRANI et al., 2015; ALMEIDA Jr et al., 2016). Dentre os estudos já realizados, destaca-se o trabalho pioneiro de Santos e Alleoni (2013), que propuseram os VRQ's para solos da região sul da Amazônia.

Entretanto, há uma carência de estudos dessa natureza que contemplem os solos dos demais estados que compõem o bioma Amazônia, dentre eles o Amazonas. Este estado representa a maior área territorial do bioma amazônico e do Brasil (cerca de 1.559.159,148 km²) e possui um papel importante no cenário nacional e internacional, uma vez que apresenta 95 % (1.493.128 km²) de sua área original preservada (IBGE, 2011). Assim, objetivou-se neste estudo quantificar os teores naturais de metais pesados nos solos do estado do Amazonas – Brasil, bem como propor os VRQ's, com objetivo de subsidiar a fundamentação de políticas públicas que visem o monitoramento e a preservação do bioma em questão.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Descrição geral da área de estudo

O estado do Amazonas abrange uma área de 1.559.159,148 km², sendo considerado o estado de maior área territorial do Brasil (Figura 1), e apresenta uma

população estimada em 3.939.336 pessoas, das quais 80% vivem em zonas urbanas e o restante vive nas zonas rurais (IBGE, 2016). O clima do estado, de acordo com a classificação de Köppen, é dividido em dois tipos: Afi (clima tropical chuvoso sem estação seca) e Ami (clima tropical chuvoso com pequeno período seco). A área apresenta ainda uma temperatura média anual de 25,9 °C, precipitação média de 2536 mm por ano e evapotranspiração média anual de 1542 mm (VIEIRA; SANTOS, 1987).



Figura 1 – Localização do estado do Amazonas no mapa político do Brasil.

3.2.1.1 Solos do bioma Amazônia (estado do Amazonas)

Os solos do bioma amazônico podem ser divididos em solos de várzea e de terra firme. Os solos de várzea acompanham as margens dos rios e estão sujeitos a inundações em uma determinada parte do ano. Já os solos de terra firme estão situados nas áreas mais elevadas das paisagens, não estando sujeitos a inundações (SIOLI, 1990).

As classes de solos predominantes na região são os Argissolos (45 %), Latossolos (26 %), Gleissolos e Neossolos Flúvicos (9 %), Espodossolos (7 %) e Plintossolos (3,5 %) (TEIXEIRA et al., 2010). Os Gleissolos e Neossolos Flúvicos são os solos que acompanham os rios de águas barrentas que cortam o estado e muitas vezes são

chamados de solos de várzea, enquanto os demais solos são conhecidos como solos de terra firme.

De maneira geral, os solos de várzea são eutróficos, com elevados teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e CTC elevada, sendo essa maior fertilidade relacionada à presença de minerais do tipo 2:1, como vermiculita, montmorilomita e illita (LIMA et al., 2006; GUYOT et al., 2007; GUIMARAES et al., 2013). Já os solos de terra firme são de baixa fertilidade, com teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e P baixos e teores elevados de Al^{3+} trocável. Essa baixa fertilidade está relacionada à pobreza do material de origem e à intensa lixiviação de bases nesses solos (LIMA, 2001; QUESADA et al., 2011). A fração argila dos solos de terra firme é composta por minerais como caulinita, gibbsita, illita, goethita e hematita (LIMA, 2001; MARQUES et al., 2002; CAMPOS, 2011).

3.2.1.2 Geologia

O estado do Amazonas possui uma extensa cobertura sedimentar, representada pelas bacias sedimentares do Acre, Solimões, Amazonas e Alto Tapajós. Tais bacias estão depositadas sobre um substrato rochoso pré-cambriano, onde ocorrem rochas de natureza ígnea, sedimentar e metamórfica (Figura 2) (REIS, ALMEIDA, 2010). As bacias sedimentares encontradas no estado apresentam os arenitos, siltitos e argilitos como suas principais rochas constituintes.

As rochas ígneas e metamórficas da região estão associadas às áreas pré-cambrianas, representadas por áreas estáveis (escudos) das Guianas e Brasil Central, situadas ao norte e sul da Bacia Amazônica, respectivamente (REIS, ALMEIDA, 2010). Nestes escudos, as principais rochas encontradas são os granitos alcalinos e gnaisses, no entanto, outras rochas como xisto-verde, diabásio e anfíbolitos podem ser encontradas.

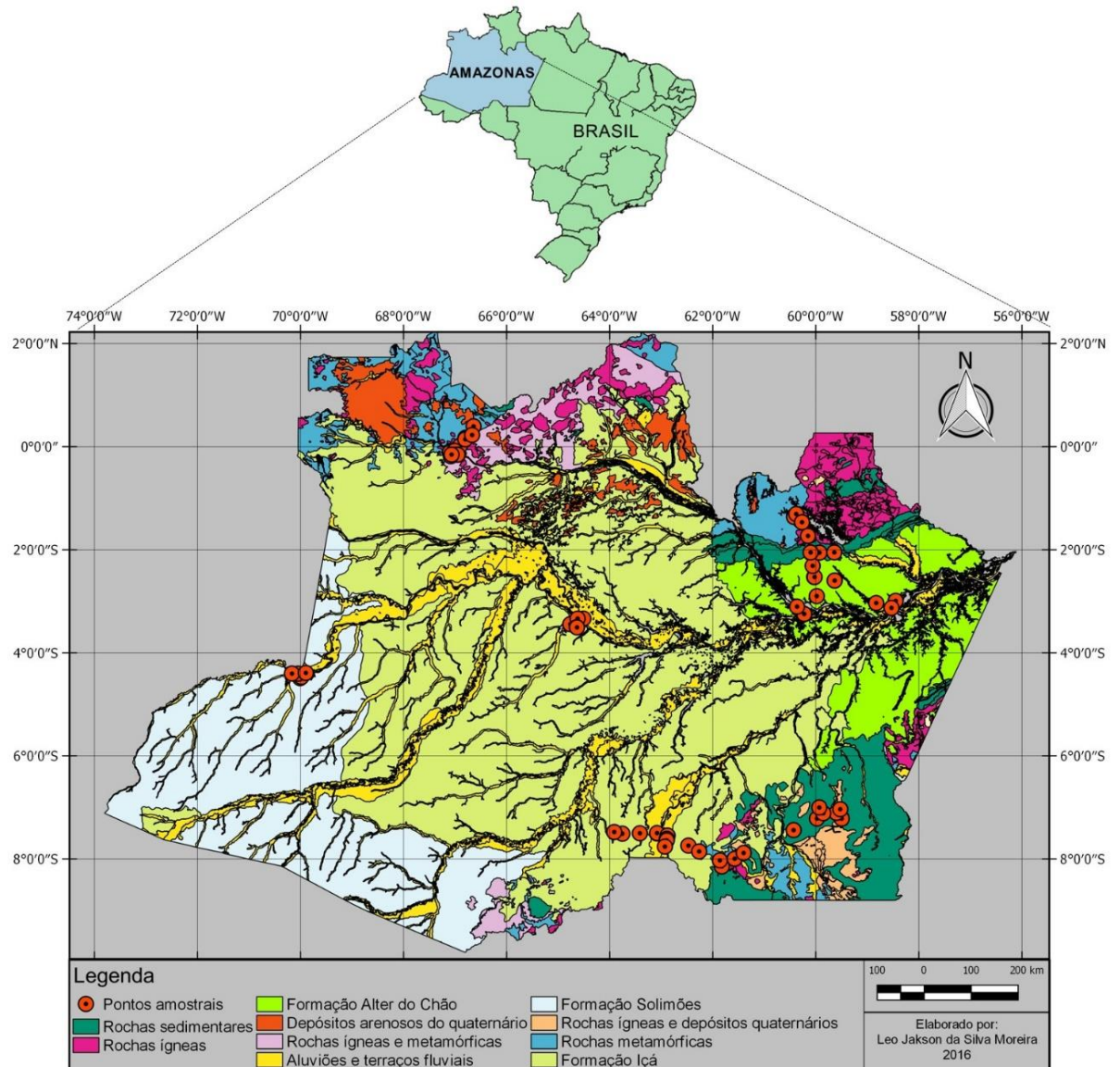


Figura 2 - Principais ocorrências geológicas do estado do Amazonas e o pontos de coleta dos solos estudados.

3.2.1.3 Vegetação

No estado do Amazonas, são destacadas quatro regiões fitoecológicas: floresta ombrófila densa, floresta ombrófila aberta, região de campinaranas e savana (IBGE, 2010b). A floresta ombrófila densa predomina na maior parte do estado, tanto nas áreas de várzea quanto nas áreas mais elevadas, com altitude superior a 2000 m. A floresta ombrófila aberta apresenta como característica principal a presença de espécies arbóreas de menor porte (altura média de 25 m), com maior espaçamento entre indivíduos, apresentando como espécies principais as palmeiras e bambus (IBGE, 2010b).

As campinaranas são vegetações adaptadas à baixa fertilidade do solo, pois sua ocorrência está associada às classes dos Espodosolos e Neossolos Quartzarênicos hidromórficos. As savanas que ocorrem no estado do Amazonas têm sua fisionomia homóloga às da Venezuela, África e Ásia e apresentam vegetação xeromorfa, na qual as espécies vegetais convivem com mais ou menos cinco meses de seca. Geralmente este tipo de vegetação está associado a solos arenosos, com elevados teores de alumínio e em contato direto com as florestas ombrófilas abertas (IBGE, 2010b).

3.2.2 Amostragem dos solos

A partir da análise conjunta do mapa pedológico (IBGE, 2010a) e geológico (CPRM, 2006) do estado do Amazonas, foram definidas áreas para a coleta de amostras, levando-se em consideração a representatividade dos diferentes materiais de origem e a ocorrência dos solos do estado. Dessa forma, foram selecionadas as áreas dos municípios de Manaus (capital), Presidente Figueiredo, Iranduba, Manacapuru, Itacoatiara, Humaitá, Manicoré, Apuí, Lábrea, Benjamin Constant, Atalaia do Norte, São Gabriel da Cachoeira e Tefé.

Ao todo, foram coletadas 71 amostras de solos (Tabela 1) em áreas de floresta nativa ou remanescente, com o mínimo de atividade antrópica (Figura 2). As amostras utilizadas neste estudo foram do tipo composta (formadas por 10 subamostras) e foram coletadas na profundidade de 0 – 20 cm, de acordo com a Resolução nº 420/2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (CONAMA, 2009). As amostras foram coletadas com o auxílio de um trado de aço inoxidável para evitar eventuais contaminações e, após a coleta, as mesmas foram armazenadas em embalagens plásticas.

Tabela 1 – Solos coletados no estado do Amazonas – Brasil para a determinação dos teores naturais de metais.

Solos	Posição na paisagem	Amostras	Número de amostras
Latossolos	Solos de Terra Firme	1 – 20	20
Argissolos	Solos de Terra Firme	21 – 40	20
Neossolo Flúvicos – NF	Solos de Várzea	41 – 46	6
Cambissolos	Solos de Terra Firme	47 – 53	7
Espodosolos	Solos de Terra Firme	54 – 58	5
Gleissolos	Solos de Várzea	59 – 63	5
Plintossolos	Solos de Terra Firme	64 – 67	4
Terra Preta de Índio - TPI	Solos de Terra Firme	68 – 71	4

* A tabela 1 do primeiro capítulo apresenta maiores informações sobre os pontos amostrais usado neste estudo.

3.2.3 Análises químicas e físicas

Os procedimentos analíticos para caracterização química e física das amostras foram realizados conforme as metodologias descritas em EMBRAPA (2011). O pH do solo em água e em KCl foi medido em solução solo:água (1:2,5). Fósforo assimilável (P) e potássio (K^+) foram determinados usando o extrator Mehlich 1. Os cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram determinados usando solução extratora de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L^{-1} . A acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) foi determinada usando solução extratora de acetato de cálcio ($Ca(OAc)_2$) 0,5 mol L^{-1} . Posteriormente, a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC) e determinada a pH 7 (CTCt), a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m) foram calculadas.

O carbono orgânico do solo foi determinado pelo método Walkley-Black sem aquecimento, que utiliza a oxidação pelo dicromato de potássio em meio ácido, seguida de titulometria de complexação com solução de sulfato ferroso (0,025 mol L^{-1}). A matéria orgânica do solo (MO) foi calculada pela seguinte fórmula: carbono orgânico do solo x 1,724 (EMBRAPA, 2011).

Para a determinação das frações granulométricas do solo foi empregado o método da pipeta, utilizando-se o hidróxido de sódio como agente dispersante. A fração areia foi separada por tamisação (peneira de 0,053 mm), enquanto as frações silte e argila foram separadas por sedimentação.

Os teores de Fe, Al, Si, Mn e Ti (expressos na forma de óxidos: Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO e TiO_2) foram determinados de acordo com o método do ataque sulfúrico adotado por EMBRAPA (2011) na fração terra fina seca ao ar (TFSA). Os teores de ferro associados a óxidos de ferro cristalinos (Fe_d) foram determinados pelo método do ditionito-citrato em sistema tamponado com bicarbonato de sódio (DCB), conforme metodologia proposta por Mehra e Jakson (1960) na fração argila dos solos. Já o ferro de baixa cristalinidade (Fe_o) presente na fração argila, foi extraído utilizando-se uma solução 0,2 M de oxalato de amônio (pH 3,0) de acordo com McKeague e Day (1966).

3.2.4 Determinação dos teores naturais dos metais nos solos

Uma alíquota da fração terra fina seca ao ar (TFSA) de cada amostra de solo foi macerada e passada em peneira de 200 mesh (0,075 mm), com malha de aço inoxidável. A partir desta fração macerada do solo, se deu a determinação dos teores

naturais de metais (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Ti, V, Zn, Zr, Mn, Al e Fe) nos solos. O procedimento para a quantificação dos metais se deu em triplicata, no qual, foi realizada via extração semitotal (EPA 3051A) (USEPA, 1998), em forno de microondas (Marca Anton Paar® - Modelo Mutiwave ECO), com o emprego dos ácidos nítrico (9 mL) e clorídrico (3 mL). Após a digestão, os elementos foram quantificados por espectrometria de emissão atômica por plasma induzido (ICP-OES). Os comprimentos de onda nos quais os metais foram analisados e os limites de detecção e quantificação praticável do método são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Comprimentos de onda utilizados para a leitura dos metais e limites de detecção e de quantificação praticável do método

Elemento	Comprimento de onda	Limite de detecção do método – LD	Limite de quantificação praticável - LQP
	nm	mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹
Bário (Ba)	233,527	0,05	0,155
Cádmio (Cd)	228,802	0,142	0,316
Cobalto (Co)	228,616	0,059	0,159
Cromo (Cr)	267,716	0,313	0,996
Cobre (Cu)	327,393	0,283	1,461
Níquel (Ni)	231,604	0,157	0,419
Chumbo (Pb)	220,353	0,641	2,318
Titânio (Ti)	334,94	0,894	3,336
Vanádio (V)	290,88	0,378	0,733
Zinco (Zn)	213,857	1,248	4,081
Zircônio (Zr)	334,823	0,560	1,938
Manganês (Mn)	257,61	10,653	35,532
Alumínio (Al)	396,153	664,702	2217,150
Ferro (Fe)	238,204	235,305	865,728

O controle de qualidade da análise foi realizado com a utilização de uma amostra de solo certificada (*San Joaquin*, NIST 2709a), que foi utilizada como referência durante os procedimentos de digestão das amostras (Tabela 3).

Tabela 3 - Recuperação dos metais no solo certificado (*San Joaquin*, NIST 2709a) pelo método EPA 3051A para a avaliação da qualidade analítica do método.

Elemento	Valor Total	Valor Recuperado ^a	Mediana	Valor Recuperado ^b	Mediana	Valor Recuperado ^c
	----- Certificado -----			----- Determinado -----		
	mg kg ⁻¹			%	mg kg ⁻¹	
Bário	979	350 – 400	380	39	365	96
Cadmio	0,37	0,33 - 0,66	0,40	110	0,37	91
Cobalto	13	8,2 – 13	10	81	11	107
Cromo	130	46 – 67	53	41	67	126
Cobre	34	24 – 28	27	81	27	99
Níquel	85	59 – 71	66	77	63	95
Chumbo	17	8,1 – 11	9	53	9	96
Titânio	-	-	-	-	-	-
Vanádio	110	43 – 71	48	44	61	127
Zinco	103	69 – 87	79	77	81	102
Zircônio	-	-	-	-	-	-
Manganês	529	380 – 450	420	79	418	100
Alumínio	73700	13000 - 17000	16000	22	18483	116
Ferro	33600	22000 - 26000	24000	70	24861	104

^a Valor recuperado certificado

^b (Valor recuperado certificado/Valor total certificado) x 100

^c (Valor recuperado determinado/Valor recuperado certificado) x 100

3.2.5 Estatística

As análises estatísticas descritivas (média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação) foram realizadas com o auxílio do programa OriginLab[®] (version 9). As análises multivariadas (análise *cluster* e componentes principais) foram conduzidas utilizando-se o programa IBM SPSS[®] (version 19). Visando-se atingir a distribuição normal dos dados, os mesmos foram submetidos à transformação do tipo *Box Cox*. As análises do tipo *cluster* foram realizadas para avaliar a dissimilaridade dos teores de metais em relação às classes de solos e, para isso, foi utilizada a distância de correlação, sendo os resultados expressos em um dendograma. A divisão dos grupos foi determinada utilizando-se o método de *Ward*.

Para o cálculo dos VRQ's foram removidas da matriz estatística as concentrações de metais consideradas *outliers* (valores discrepantes em relação ao conjunto dos dados) e as referentes às Terras Pretas de Índio (TPI). A remoção das TPI para os cálculos dos VRQ's está baseado no fato que as atividades antropogênicas podem influenciar nos resultados, tendo em vista o caráter acumulador de compostos de natureza orgânica e inorgânica praticado por tais povos no passado. Os VRQ's foram determinados

com base nos percentis P75 e P90, conforme as diretrizes dispostas na resolução nº 420/2009 do CONAMA (CONAMA, 2009).

O gráfico do tipo *box-plot* foi usado na identificação e posterior remoção dos *outliers*, no qual estes são os valores superiores ou inferiores aos limites superior (LS) ou inferior (LI), respectivamente, conforme Reimann et al. (2005). Tais limites são calculados com base no percentil 75 (P75) e percentil 25 (P25), conforme as equações 1 e 2:

$$LS = P75 + 1,5 \times (P75 - P25) \quad (1)$$

$$LI = P25 - 1,5 \times (P75 - P25) \quad (2)$$

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Atributos químicos e físicos dos solos

Os resultados das análises de caracterização química e física dos solos são apresentados na Tabela 4. De maneira geral, os solos apresentaram um elevado coeficiente de variação (CV) em seus atributos. Os solos mostraram-se ácidos, com pH médio inferior a 5. Os valores das variáveis relacionadas à fertilidade dos solos (P, Ca²⁺, Mg²⁺) apresentaram um CV elevado, superior a 150 %. Dentre as bases trocáveis, o Ca²⁺ apresentou maior contribuição na capacidade de troca catiônica (CTC) e na soma de bases (SB). A capacidade de troca de cátions efetiva (CTC) e a determinada a pH 7 (CTCt) apresentaram valores médios de 4,4 e 10,1 cmol_c dm⁻³, respectivamente. O teor de matéria orgânica nos solos apresentou um valor médio de 3,6 g kg⁻¹, variando entre 0,9 e 8,4 g kg⁻¹. Observou-se ainda o predomínio de óxidos de ferro bem cristalizados (Fed) (média de 47,3 g kg⁻¹) em relação às formas de ferro de baixa cristalinidade (Feo) (média de 4,7 g kg⁻¹). Os teores de ferro (Fe₂O₃), alumínio (Al₂O₃), silício (SiO₂) e titânio (TiO₂) extraídos com ácido sulfúrico, expressos na forma de óxidos, apresentaram valores médios de 53,0; 118,1; 135,5 e 4,3 g kg⁻¹, respectivamente. O teor médio de argila obtido foi de 38,8 dag kg⁻¹, com variação entre 2 e 91 dag kg⁻¹, indicando assim solos com textura arenosa até solos de textura muito argilosa.

Tabela 4 – Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos dos solos estudados,

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
pH (H ₂ O)	4,6	7,1	3,7	0,7	15
pH (KCl)	4,1	6,5	2,5	0,6	14
P (mg dm ⁻³)	9,4	107,4	0,6	20,5	219
K ⁺ (mg dm ⁻³)	28,3	94,0	0,0	18,4	65
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,7	18,1	0,0	3,5	211
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,5	4,6	0,0	0,8	158
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	2,1	8,9	0,0	2,0	97
H+Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	7,8	21,9	1,0	3,4	43
SB (cmol _c dm ⁻³)	2,3	23,0	0,1	4,3	189
CTC (cmol _c dm ⁻³)	4,4	23,0	0,8	4,3	99
CTCt (cmol _c dm ⁻³)	10,1	24,8	3,6	4,4	44
V (%)	16,9	94,2	1,0	24,3	144
m (%)	65,2	98,9	0,0	32,2	49
MO (g kg ⁻¹)	3,6	8,4	0,9	1,6	44
P-Rem (mg L ⁻¹)	22,6	59,9	8,9	11,7	52
Fe _d (g kg ⁻¹)	47,3	203,2	0,0	36,6	77
Al _d (g kg ⁻¹)	8,6	23,0	0,0	4,8	56
Fe _o (g kg ⁻¹)	4,7	12,9	0,0	3,5	73
Al _o (g kg ⁻¹)	4,1	19,1	0,0	2,8	68
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	53,0	199,7	0,1	43,7	82
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	118,1	330,5	0,8	81,6	69
SiO ₂ (g kg ⁻¹)	135,5	343,0	4,8	84,4	62
TiO ₂ (g kg ⁻¹)	4,3	23,5	0,2	3,8	90
Argila (dag kg ⁻¹)	38,8	91,0	2,0	21,4	55
Silte (dag kg ⁻¹)	20,9	74,0	0,0	21,0	101
Areia (dag kg ⁻¹)	40,3	95,0	1,0	27,7	69

SB = K⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺; CTC = SB + (H⁺ + Al³⁺); CTC = SB + Al³⁺; V (%) = (SB / CTC) x 100; m (%) = Al³⁺ / (CTC) x 100

3.3.2 Teores naturais dos metais nos solos

Os dados referentes aos teores naturais de metais pesados nos solos não apresentaram distribuição normal, conforme observado na Figura 3. Os histogramas evidenciam que grande parte das amostras (o número de amostras é indicado nos gráficos como frequência) apresentou teores de metais inferiores ou próximos da média e que apenas um menor número de amostras foi responsável por teores elevados de metais nos solos amostrados.

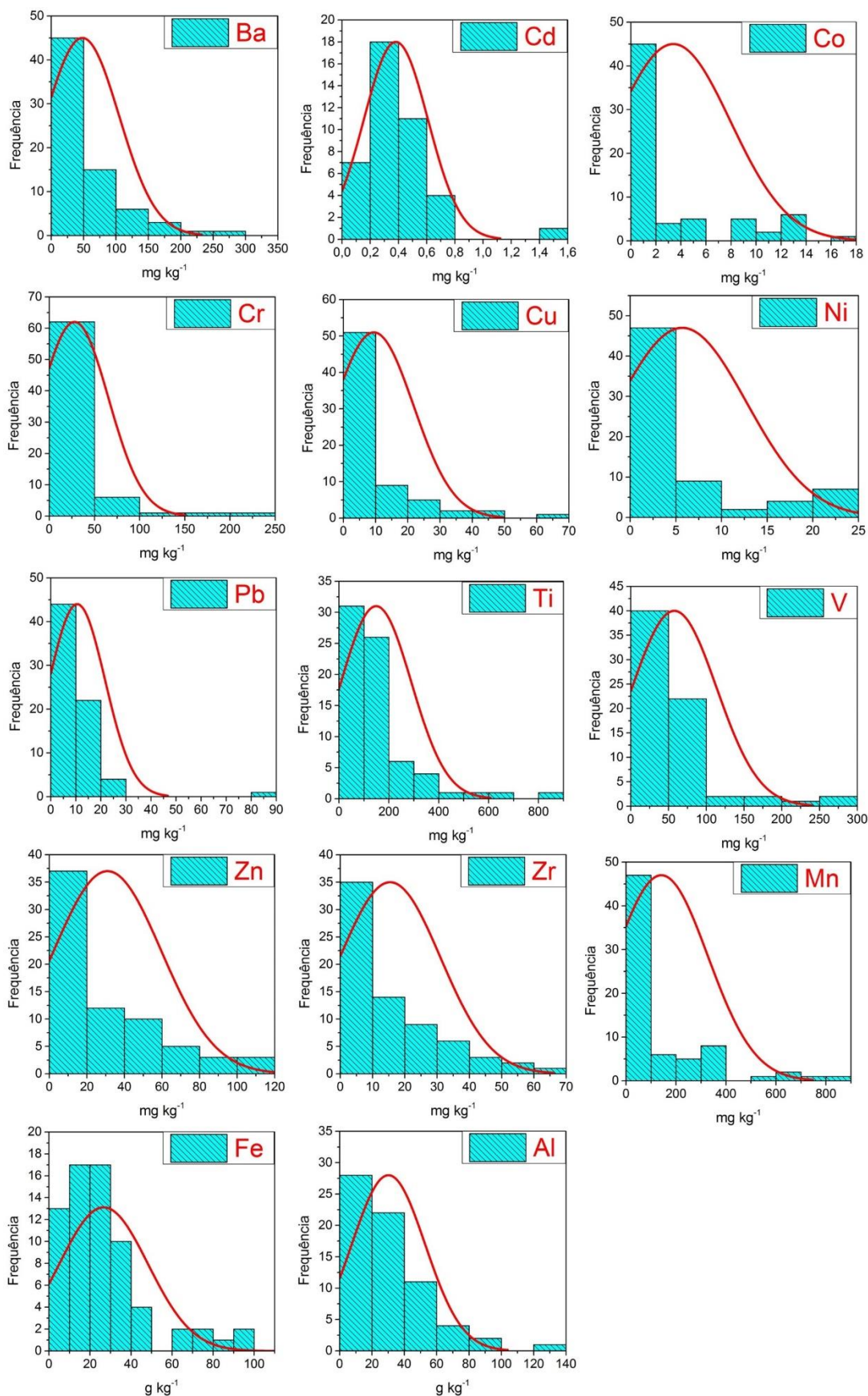


Figura 3 - Histogramas de frequência absoluta para metais nos solos estudados com base nos teores naturais extraídos em digestão ácida. Nos gráficos, o valor médio da concentração de cada metal corresponde ao ponto de pico do histograma (linha vermelha).

Os dados referentes aos teores máximo e mínimo, mediana, média e percentis 25 e 75 de cada metal, independente da classe de solo, podem ser observados na Figura 4. Além disso, os resultados dos teores dos metais obtidos em cada amostra analisada são apresentados na Tabela 5.

Os menores teores médios foram observados nos elementos Cd ($0,38 \text{ mg kg}^{-1}$), Co ($3,39 \text{ mg kg}^{-1}$), Ni ($5,69 \text{ mg kg}^{-1}$), Cu ($9,42 \text{ mg kg}^{-1}$) e Pb ($10,53 \text{ mg kg}^{-1}$). Os maiores teores médios foram encontrados nos elementos Al ($30,14 \text{ g kg}^{-1}$), Fe ($26,62 \text{ g kg}^{-1}$), Ti ($148,68 \text{ mg kg}^{-1}$), Mn ($140,89 \text{ mg kg}^{-1}$), V ($57,58 \text{ mg kg}^{-1}$), Ba ($47,96 \text{ mg kg}^{-1}$) e Zn ($30,94 \text{ mg kg}^{-1}$).

Os maiores teores de Cr ($242,39 \text{ mg kg}^{-1}$), Cu ($65,47 \text{ mg kg}^{-1}$), Ti ($806,73 \text{ mg kg}^{-1}$) e V ($291,91 \text{ mg kg}^{-1}$) estão na amostra 13 da classe dos Latossolos. Nesta mesma classe também são encontrados os maiores teores para os elementos Pb ($86,06 \text{ mg kg}^{-1}$), Zr ($67,09 \text{ mg kg}^{-1}$), Al ($131,26 \text{ g kg}^{-1}$) e Fe ($99,67 \text{ g kg}^{-1}$). As amostras 34 e 37, pertencentes à classe dos Argissolos, apresentaram os teores máximos dos elementos Cd ($1,44 \text{ mg kg}^{-1}$) e Mn (843 mg kg^{-1}), respectivamente.

A amostra 52 pertencente a classe dos Cambissolos têm os maiores teores de Ba ($296,12 \text{ mg kg}^{-1}$) e Co ($16,07 \text{ mg kg}^{-1}$). Os teores máximos dos elementos Ni ($24,21 \text{ mg kg}^{-1}$) e Zn ($111,13 \text{ mg kg}^{-1}$) foram obtidos nas amostras 44 e 59, associadas às classes dos Neossolos Flúvicos e Gleissolos, respectivamente. Os teores mínimos dos metais foram observados principalmente na classe dos Espodossolos.

Observou-se a seguinte ordem decrescente quanto aos teores médios de metais pesados obtidos: Al > Fe > Ti > Mn > V > Ba > Zn > Cr > Zr > Pb > Cu > Ni > Co > Cd. A variação dos teores de cada elemento, independente da classe de solo e visualizada por intermédio do coeficiente de variação dos dados, indica que a menor variação foi obtida para o elemento Cd (60 %) e a maior para o elemento Cr (136 %).

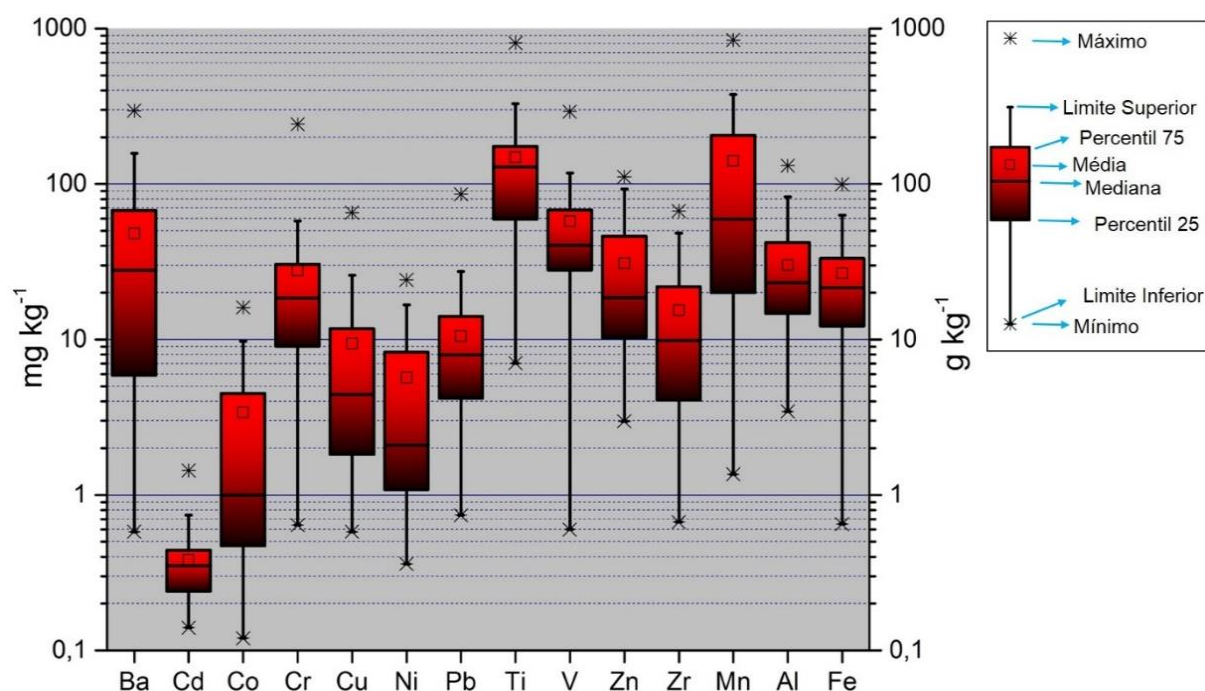


Figura 4 - Teores mínimo e máximo, percentis 25 e 75, mediana e média dos teores de metais pesados nos solos estudados. Os elementos Al e Fe são expressos em g kg^{-1} .

Tabela 5 – Teores naturais de metais pesados extraídos em digestão ácida de 71 amostras de solos coletadas no estado do Amazonas – Brasil.

Amostras	mg kg^{-1}											g kg^{-1}		
	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Ti	V	Zn	Zr	Mn	Al	Fe
LATOSSOLOS														
1	2,35	0,2	0,22	56,55	4,09	1,29	3,12	155,57	49,94	8,66	46,86	79,35	45,72	18,02
2	2,69	<LD	0,15	44,35	1,82	1,61	6,32	112,32	32,94	6,56	30,72	59,35	53,97	10,32
3	3,75	0,41	0,38	54,94	6,32	1,48	4,64	176,38	83,57	25,33	48,04	59,68	47,26	37,6
4	9,68	0,18	0,42	39,74	1,11	1,32	5,71	146,89	67,96	10,67	39,31	19,91	53,13	24,00
5	3,04	0,35	0,31	35,47	1,28	1,05	4,18	132,27	38,59	7,06	33,28	19,8	31,04	12,04
6	3,89	<LD	0,28	42,63	2,5	1,44	4,37	137,77	54,08	10,56	37,22	19,86	42,00	14,85
7	17,87	0,29	0,59	9,53	2,22	1,99	4,32	147,96	15,36	8,60	13,25	59,43	14,54	4,23
8	43,41	<LD	4,35	162,43	16,44	12,13	24,31	529,24	269,29	54,17	67,09	109,82	69,89	99,67
9	30,54	0,34	1,13	32,45	4,45	1,63	7,98	202,92	85,84	17,11	34,62	59,59	35,67	43,49
10	26,58	0,6	1,32	49,54	9,45	3,2	11,26	36,2	72,39	15,15	21,01	49,42	32,97	33,22
11	41,98	0,32	1,15	53,86	2,68	<LD	11,43	328,99	212,46	33,19	59,89	19,91	131,26	83,82
12	237,94	0,61	2,04	78,55	17,01	9,44	86,06	129,02	117,79	46,01	31,88	19,91	49,08	63,1
13	13,76	<LD	8,83	242,39	65,47	21,87	9,85	806,73	291,91	54,64	24,31	355,5	41,81	94,15
14	57,59	0,44	0,41	2,47	1,07	<LD	18,74	141,55	42,75	19,31	10,37	19,89	47,09	20,51
15	86,34	<LD	1,29	10,03	1,05	1,01	24,33	191,16	87,05	24,04	19,31	59,6	62,55	49,97
16	18,89	0,46	0,49	18,37	2,05	0,68	5,52	102,37	54,74	10,43	12,83	59,43	43,22	22,95
17	51,11	<LD	1,44	27,41	6,51	2,62	20,11	194,44	89,77	21,95	11,05	59,38	49,88	39
18	5,89	<LD	0,29	9,55	0,85	1,34	3,8	73,21	31,96	4,99	2,86	49,48	23,92	5,66
19	80,32	<LD	0,16	2,05	2,76	0,59	19,18	85,72	35,83	11,72	10,54	59,88	43,45	13,35
20	13,52	<LD	0,55	15,9	2,48	0,68	5,96	151,2	71,16	16,57	7,72	59,6	82,69	34,81

Continua...

Tabela 5 – Continuação...

Amostras	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Ti	V	Zn	Zr	Mn	Al	Fe
----- mg kg ⁻¹ -----													--- g kg ⁻¹ ---	
ARGISSOLOS														
21	0,58	<LD	0,12	4,68	0,73	0,53	0,74	59,29	7,41	<LD	3,99	19,85	3,9	1,92
22	1,13	<LD	0,16	4,5	3,2	0,66	1,45	68,33	9,64	6,1	6,3	1,36	7,9	2,2
23	4,48	0,63	0,25	5,89	<LD	0,9	3,84	138,56	19,35	10,14	57,36	39,55	23,37	20,97
24	5,17	0,26	0,52	13,66	1,46	1,37	5	98,6	34,26	17,79	20,57	39,64	34,3	27,15
25	9,77	<LD	0,35	6,46	1	1,65	2,59	82,75	31,13	8,3	24,09	59,68	27,2	17,64
26	2,88	<LD	0,51	26,33	2,34	1,12	4,04	172,84	63,95	13,49	17,6	19,92	14,81	23,75
27	14,43	0,33	0,55	30,52	0,75	0,93	9,16	158,66	60,29	14,83	22,12	19,75	17,81	24,78
28	1,8	<LD	0,45	8,88	1,44	0,68	3,29	131,16	21,03	4,16	11,38	19,84	10,19	8,41
29	22,69	0,24	0,8	12,38	4	2,47	6,24	33,5	20,64	12,97	2,95	49,64	10,68	10,37
30	8,29	0,58	0,73	10,52	2,33	2,76	3,09	145,11	15,68	10,21	9,15	39,59	12,44	2,67
31	23,92	0,26	1,15	12,07	3,94	1,08	8,8	350,42	32,7	13,25	20,67	178,35	23,87	25,9
32	48,25	<LD	3,94	68,34	9,11	8,66	17,12	425,64	97,12	30,12	25,48	316,13	28,92	37,23
33	11,67	<LD	5,59	57,89	11,7	14,8	12,93	174,1	179,7	40,08	28,58	39,88	25,53	61,09
34	101,2	1,44	0,82	5,51	0,92	1,28	7,12	65,92	19,45	16,7	21,81	39,57	22,86	25,13
35	74,4	<LD	13,94	20,5	21,55	8,85	16,59	18,59	50,19	71,16	4,11	316,42	16,93	21,28
36	54,9	0,21	2,77	21,45	22,7	5,37	13,93	18,73	70,74	46,06	5,13	118,79	18,43	23,81
37	60,7	0,44	13,57	13,31	8,26	4,87	14,84	22,59	32,17	49,18	3,36	843,35	12,94	17,85
38	4,86	<LD	0,21	4,45	1,44	0,44	2,5	57,47	23,44	7,05	3,1	59,5	12,32	6,38
39	15,44	<LD	1	24,17	4,88	1,7	3,96	159,54	108,86	19,52	7,11	59,5	64,2	43,55
40	19,98	0,14	0,62	12,54	2,03	1,53	3,6	129,12	29,03	6,81	4,3	39,57	12,94	8,27
NEOSSOLOS FLÚVICOS														
41	55,99	0,44	9,19	13,59	12,54	16,32	9,64	69,81	17,27	54,59	2,39	257,41	8,56	19,61
42	67,54	0,45	8,9	12,41	10,92	16,68	9,76	75,28	16,37	54,17	2,25	259,25	7,92	18,21
43	135,73	0,57	13,53	25,9	34,23	22,36	15,19	277,79	47,64	92,94	9,52	674,26	21,97	31,3
44	163,8	0,18	13,24	28,22	40,01	24,21	19,75	210,94	56	103,27	10,15	525,7	29,77	32,73
45	119,82	<LD	9,59	22,1	18,84	15,97	11,4	248,16	45,46	72,41	5,71	236,8	18,55	21,71
46	124,93	0,35	11,76	23,06	19,08	15,97	12,24	307,99	46,41	87,87	6,94	377,14	21,2	22,62
CAMBISSOLOS														
47	38,33	0,34	1	18,43	5,87	4,1	7,34	59,15	28,36	20,5	3,6	39,63	16,54	15,97
48	31,21	0,18	0,57	18,5	6,5	2,26	4,76	79,13	36,73	12,83	4,35	19,82	13,86	18,73
49	28,09	<LD	0,71	24,34	7,36	2,81	9,61	34,41	56,54	12,07	4,99	19,89	19,35	11,57
50	27,92	0,38	1,17	11,76	2,55	2,36	5,3	43,04	27,78	13,93	2,7	19,76	12,02	9,72
51	100	<LD	0,88	9,02	9,07	2,67	7,33	48,17	27,88	20,48	2,59	19,86	12,92	8,44
52	296,12	<LD	16,07	14,77	13,44	8,28	14,07	21,42	40,35	71,27	3,95	673,17	16,37	17,33
53	56,46	<LD	2,73	19,15	23,25	5,14	13,02	20,7	52,49	51,36	4,02	49,52	20,01	21,05
ESPODOSSOLOS														
54	2,57	<LD	<LD	0,89	0,92	0,65	0,8	10,45	<LD	6,02	0,67	1,36	3,45	<LD
55	10,54	0,37	0,2	1,36	0,69	0,36	6,22	75,31	7,46	6,68	10,5	39,82	10,62	1,58
56	2,96	<LD	0,31	0,83	0,58	0,42	2,53	146,67	0,6	3,41	1,85	39,79	<LD	0,65
57	0,74	<LD	<LD	0,71	2,57	0,39	1,63	49,39	0,69	2,98	<LD	39,54	<LD	<LD
58	1,05	0,4	<LD	0,64	2,23	0,39	1,45	7,04	<LD	5,24	1	19,84	<LD	<LD

Continua...

Tabela 5 – Continuação...

Amostras	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Ti	V	Zn	Zr	Mn	Al	Fe
----- mg kg ⁻¹ -----												--- g kg ⁻¹ ---		
GLEISSOLOS														
59	150,07	0,38	12,51	30,35	28,34	20,78	19,63	249,63	59,53	111,13	9,53	347,77	38,73	27,5
60	80,94	0,14	4,63	16,91	7,03	7,82	12,85	36,15	28,59	34,98	2,83	59,31	17,06	14,75
61	81,53	0,4	1,65	23,99	9,02	8,27	15,7	43,81	36,29	22,98	4,25	19,97	34,53	7,58
62	116,57	0,74	12,87	23,69	25,84	23,92	19,81	79,44	34,03	93,06	4,07	309,64	20,11	33,12
63	157,66	0,27	11,06	29,32	33,79	21,46	16,44	237,75	58,48	105,16	10,18	158,6	31,06	22,91
PLINTOSSOLOS														
64	5,57	<LD	0,93	24,05	4,74	1,25	6,71	126,6	96,79	17,59	13,1	49,79	20,18	27,27
65	15,45	0,14	0,95	6,3	4,4	2,08	9,27	83,22	9,93	8,43	8,7	139,45	19,27	14,75
66	52,03	0,23	9,74	12,91	1,7	6,81	10,67	146,85	30,94	38,95	6,41	365	16,3	78,01
67	47,91	0,16	4,13	8,19	1,3	3,51	8,66	68,32	19,63	23,54	3,2	205,05	9,87	41,09
TERRA PRETA DE ÍNDIO														
68	67,42	0,55	1,36	31,81	16,39	4,48	5,43	129,26	71,54	66,94	10,48	219,52	25,81	32,92
69	70,11	<LD	5,04	139,72	48,98	21,05	27,35	639,04	187,7	78,29	48,22	729,89	92,86	72,45
70	32,71	0,24	0,7	21,67	6,18	2,09	4,04	136,95	32,35	26,77	9,32	328,41	25,29	12,26
71	25,66	<LD	1,02	7,29	5,58	0,91	16,95	301,44	67,14	41,2	10,62	139,42	62,83	39,03
Média	47,96	0,38	3,39	27,80	9,42	5,69	10,53	148,68	57,58	30,94	15,42	140,89	30,14	26,62
Máximo	296,12	1,44	16,07	242,39	65,47	24,21	86,06	806,73	291,91	111,13	67,09	843,35	131,26	99,67
Mínimo	0,58	0,14	0,12	0,64	0,58	0,36	0,74	7,04	0,6	2,98	0,67	1,36	3,45	0,65
DP	56,74	0,23	4,58	37,72	12,33	7,05	11,11	140,79	55,99	28,66	15,62	186,47	22,69	21,59
CV	118%	60%	135%	136%	131%	124%	106%	95%	97%	93%	101%	132%	75%	81%

< LD – Menor que o limite de detecção do método.

3.3.3 Teores naturais dos metais por classe de solo e análise multivariada

Os maiores teores médios por classe de solo (Figura 5) foram observados nas áreas de várzea, onde a classe dos Neossolos Flúvicos têm as maiores médias dos elementos Co (11,01 mg kg⁻¹), Ni (18,59 mg kg⁻¹), Cu (20,80 mg kg⁻¹), Zn (77,54 mg kg⁻¹) e Mn (388,43 mg kg⁻¹), enquanto os Gleissolos apresentam as maiores médias para Pb (16,88 mg kg⁻¹) e Ba (117,35 mg kg⁻¹). Nos solos de terra firme, a Terra Preta do Índio têm as maiores médias para Cr (50,12 mg kg⁻¹), Ti (301,68 mg kg⁻¹) e Al (51,70 g kg⁻¹), e os Latossolos têm as maiores médias para Zr (28,11 mg kg⁻¹) e V (90,27 mg kg⁻¹) e os Plintossolos com a maior média de Fe (40,28 g kg⁻¹). A maior média nos Argissolos é referente ao elemento Cd (0,45 mg kg⁻¹).

A classe dos Espodossolos apresentou a menor média para os elementos Ba (3,57 mg kg⁻¹), Co (0,25 mg kg⁻¹), Cr (0,88 mg kg⁻¹), Cu (1,40 mg kg⁻¹), Ni (0,44 mg kg⁻¹), Pb (2,53 mg kg⁻¹), V (2,92 mg kg⁻¹), Zn (4,87 mg kg⁻¹), Zr (3,51 mg kg⁻¹), Mn (28,10 mg kg⁻¹), Al (7,06 g kg⁻¹) e Fe (1,12 g kg⁻¹). O menor teor médio para o elemento Cd

($0,18 \text{ mg kg}^{-1}$) foi encontrado na classe dos Plintossolos, enquanto que, a classe dos Cambissolos apresentou o menor teor médio para o elemento Ti ($43,72 \text{ mg kg}^{-1}$).

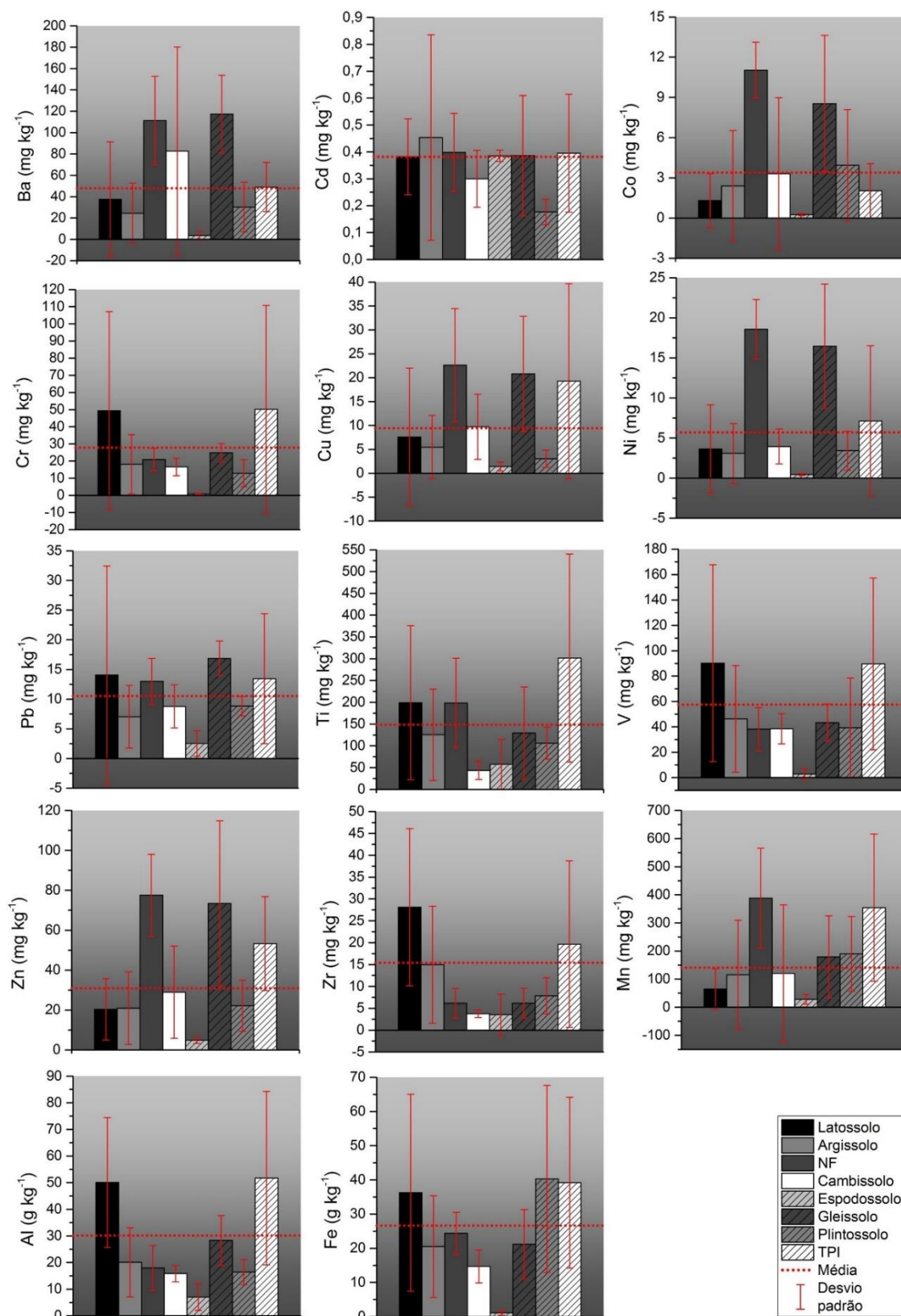


Figura 5 – Teores médios de cada metal por classes de solos estudados.

A análise de componentes principais (ACP) identificou duas componentes que têm poder de explicação de 78 % na variação dos teores de metais pesados nos solos estudados (Tabela 6). A primeira componente principal explica 43,24 % dos resultados, sendo Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Zn e Mn as variáveis que apresentam carga fatorial maior que 0,7 e têm maior influência na variação do dados nesta componente, enquanto a segunda componente principal explica 34,56 % dos resultados e apresenta os elementos Cr, Ti, V, Zr, Al e Fe com carga fatorial maior que 0,7 e representam as variáveis que maior têm poder de explicação dos resultados na segunda componente principal (Tabela 7).

Tabela 6 - Resultados dos autovalores para a extração das componentes principais e variância total explicada pelas componentes para a profundidade de 0 – 20 cm dos solos estudados

Componentes	----- Autovalores iniciais -----			Autovalores após rotação Varimax		
	Total	% de Variância	Cumulativa	Total	% de Variância	Cumulativa
1	7,254	55,799	55,799	5,622	43,243	43,243
2	2,860	22,000	77,799	4,492	34,556	77,799
3	0,802	6,166	83,965			
4	0,668	5,136	89,101			
5	0,313	2,409	91,510			
6	0,296	2,275	93,785			
7	0,257	1,980	95,766			
8	0,160	1,233	96,999			
9	0,138	1,065	98,064			
10	0,094	0,721	98,785			
11	0,072	0,558	99,343			
12	0,044	0,342	99,685			
13	0,041	0,315	100,000			

Tabela 7 - Resultado da matriz das cargas fatoriais para as 2 primeiras componentes após rotação pelo método Varimax.

Variáveis	----- Componentes -----	
	1	2
Ba	0,857	0,088
Co	0,936	0,173
Cr	0,410	0,772
Cu	0,844	0,157
Ni	0,889	0,086
Pb	0,731	0,416
Ti	0,107	0,766
V	0,353	0,873
Zn	0,913	0,265
Zr	-0,140	0,905
Mn	0,765	0,113
Al	0,110	0,885
Fe	0,468	0,788

As variáveis que apresentaram cargas fatoriais maior que 0,7 estão destacadas na matriz fatorial.

Com o uso da ACP, observou-se a formação de seis grupos de solos com relação aos teores de metais, e que de alguma forma estão relacionados entre si pelos processos pedogenéticos de formação do solo, bem como o ambiente no qual estes solos estão localizados. Os grupos 1 e 2 são formados pelos solos que apresentam os maiores teores para os elementos Cr, Ti, V, Zr, Al e Fe. Estes solos estão na direção positiva da segunda componente principal, direção essa também na qual estão os elementos supracitados (Figura 6 A e B). Observa-se ainda, que o grupo 1 é formado principalmente por Latossolos, Argissolos e uma única amostra da classe dos Plintossolos, enquanto o grupo 2 é formado por algumas amostras dos Latossolos, Argissolos e Terras Pretas de Índio.

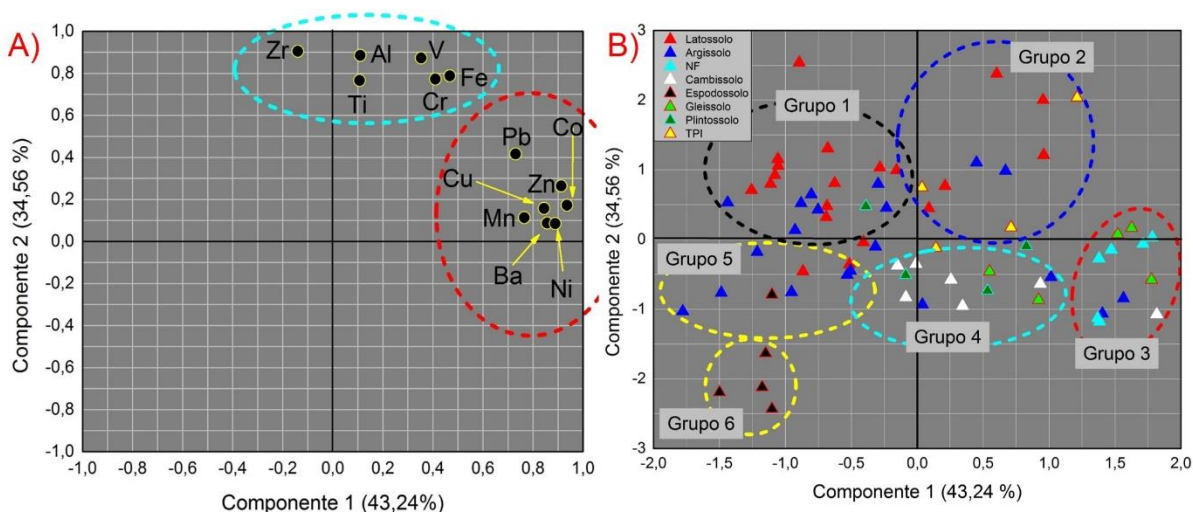


Figura 6 – Distribuição das cargas fatoriais para os metais (A) e distribuição dos escores de cada observação (amostra de solo) (B), para os solos estudados.

Os Neossolos Flúvicos, duas amostras de Argissolos, três amostras dos Gleissolos e uma única amostra da classe dos Cambissolos formam o grupo 3, reunindo principalmente os solos de várzea. Estes solos, de maneira geral, apresentam os maiores teores dos elementos Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Zn e Mn (Figura 6 A e B).

O grupo 4 é principalmente formado pelos Cambissolos, Gleissolos, Plintossolos e Argissolos, sendo que este apresenta teores medianos para os elementos Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Zn e Mn. O grupo 5 é formado por algumas amostras dos Argissolos, Latossolos e uma única amostra dos Espodossolos, sendo que neste grupo, de maneira geral, apresentam os menores teores para os elementos Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Zn e Mn. O

grupo 6 é formado unicamente por Espodossolos, sendo que neste grupo são encontrados os menores teores de metais nos solos estudados.

Ao utilizar a análise *cluster* para visualizar o comportamento dos metais pesados, observou-se a formação de dois grupos (Figura 7). O primeiro grupo é formado pelos metais Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Cu e Mn, enquanto o segundo grupo é formado pelos metais Cr, V, Fe, Ti, Zr e Al, resultado semelhante à ACP. Assim, o primeiro grupo, de maneira geral, é formado por metais pesados que apresentam maior mobilidade nos solos e que neste estudo apresentam seus maiores teores nos solos de várzea, enquanto o segundo grupo é formado por metais que são considerados de menor mobilidade nos solos e desta forma sendo acumulados nos solos de terra firme.

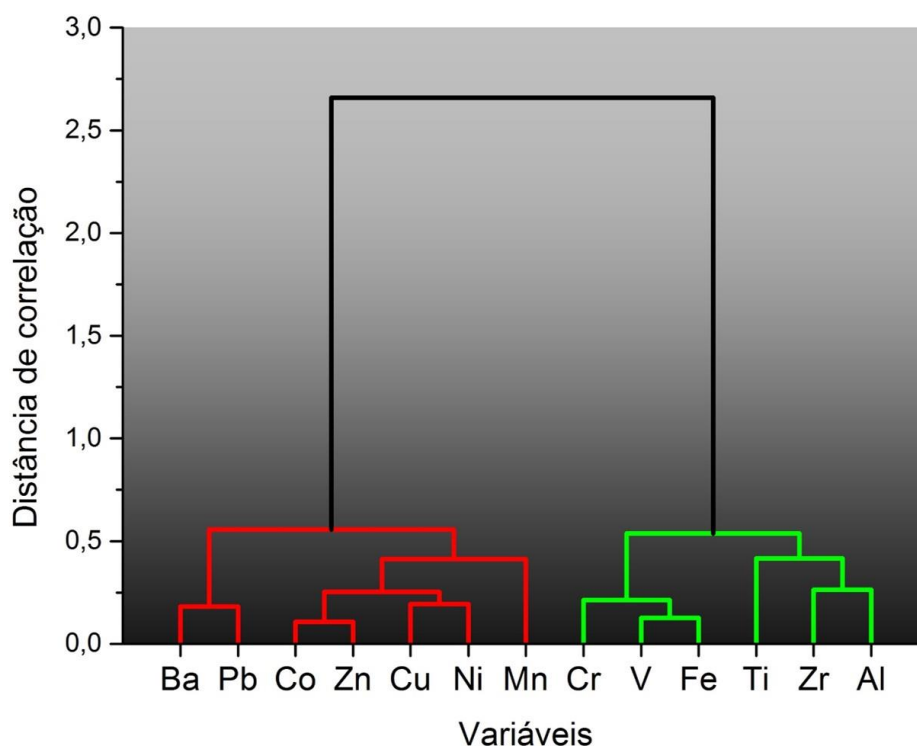


Figura 7 – Análise *cluster* para os metais pesados dos solos estudados e a sua divisão em dois grupos.

A análise *cluster* foi também utilizada visando-se entender o comportamento dos solos em relação aos teores de metais pesados (Figura 8). Assim, observou-se a formação de seis grupos de solos (G1, G2, G3, G4, G5 e G6), onde cada grupo apresenta características comuns (teores de metais pesados) e há, portanto, diferenças entre grupos em relação aos teores de metais.

Dentre os grupos observados, o G5 e o G6 apresentaram comportamento diferenciado, distinguindo-se dos demais pelo fato de ser representado principalmente

pela classe dos Espodosolos e por solos com os menores teores de metais pesados. Os grupos G1 e G2 são formados principalmente por Latossolos e Argissolos, respectivamente, que estão situados nas áreas de terra firme e nestes dois grupos são encontrados os maiores teores para os elementos Cr, V, Fe, Ti, Zr e Al. O grupo G3 apresenta teores medianos para os elementos Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Cu e Mn, enquanto o grupo G4 é constituído principalmente pelos solos de várzea e estes apresentam como característica comum os maiores teores dos elementos considerados de maior mobilidade, neste caso os elementos Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Cu e Mn.

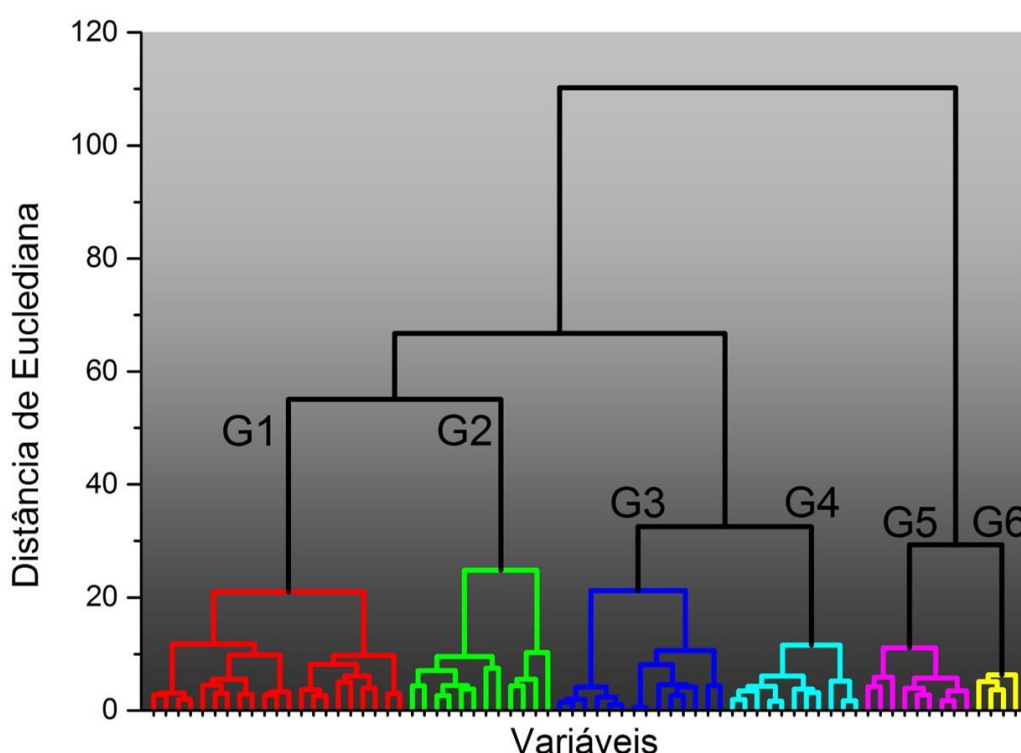


Figura 8 – Análise *cluster* para os teores de metais pesados para os solos estudados.

3.3.4 Valores de referência de qualidade para metais pesados

Para a determinação dos VRQ's os valores considerados *outliers* foram removidos com o emprego do gráfico de caixa (*box plot*) (Figuras 9A e 9B). Na Tabela 8 são apresentados os resultados propostos para os valores de referência de qualidade para metais pesados nos solos estudados, obtidos com base nos percentis 75 (P75) e 90 (P90), bem como uma descrição estatística para cada elemento analisado. Dentre os elementos, somente o Cd apresentou mais da metade das observações com valores inferiores ao limite de detecção (LD) e, dessa forma, foram utilizadas as normas estabelecidas na resolução

420/2009 do CONAMA (CONAMA, 2009) para o cálculo do VRQ desse metal. Assim, os valores menores que o limite de detecção foram substituídos pelo LQP/2 na matriz dos dados e usados na interpretação estatística para a proposição do VRQ para o elemento Cd.

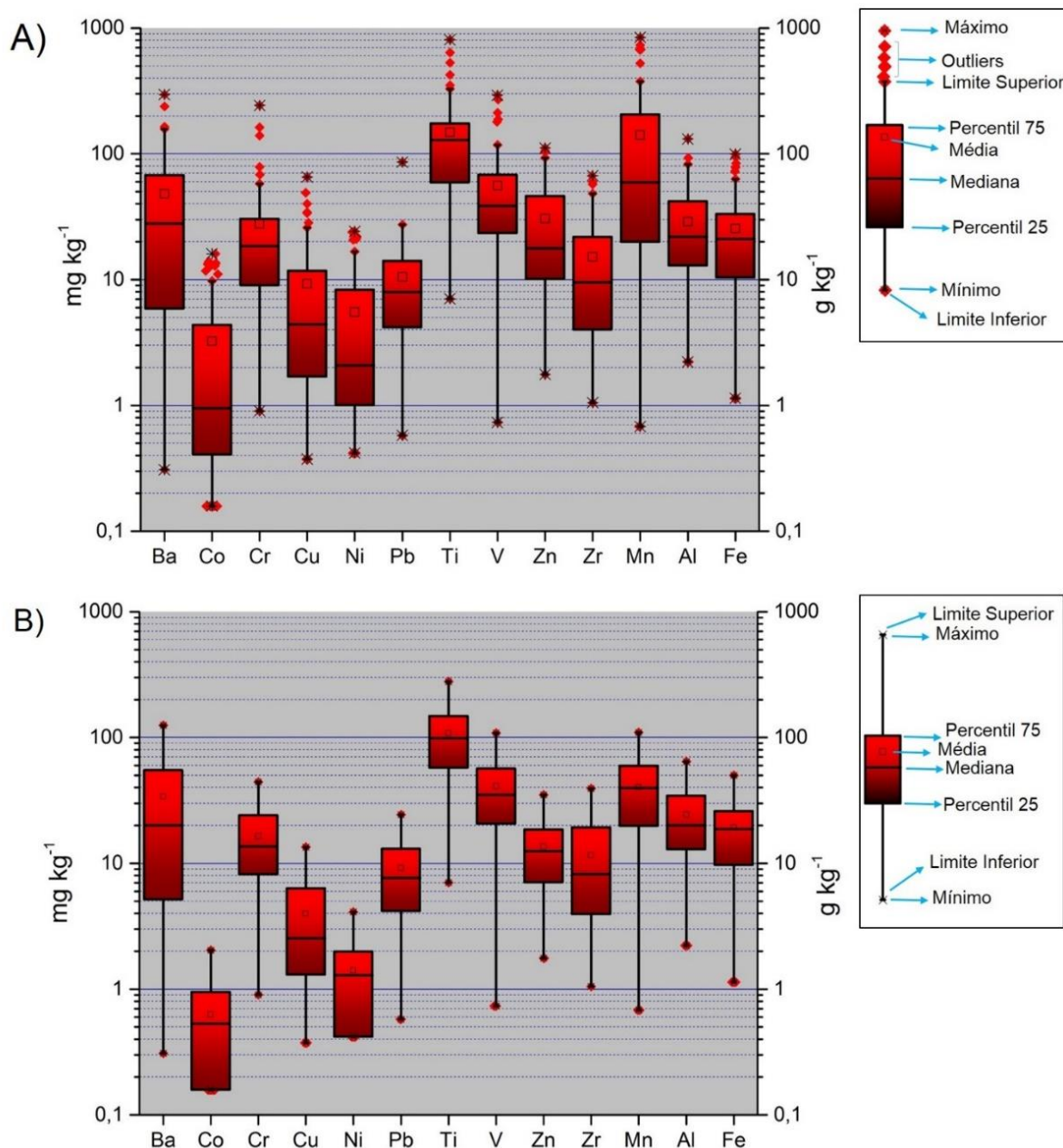


Figura 9 – Diagrama com a identificação de amostras consideradas *outliers* para cada metal pesado e sua descrição estatística básica (A). Diagrama após a remoção dos valores considerados *outliers* (B). Os teores de Al e Fe estão expressos em g kg⁻¹.

Os VRQ's obtidos com base no percentil 90 (P90) mostraram-se superiores aos obtidos com base no percentil P75 (P75) para todos os metais, exceto o Mn, com uma diferença que, de maneira geral, variou de 22 a 48 % entre os valores de P75 e P90. Além

disso, observou-se que os VRQ's estabelecidos com base nos percentis P75 e P90 para os metais pesados apresentaram resultados inferiores aos valores de prevenção (VP) e aos valores de investigação (VI) adotados atualmente pela legislação brasileira.

Utilizando-se outros procedimentos para a determinação de valores de referência para metais pesados em solos (ex: Média + 2xDP e Mediana + 2xDMA), observou-se que, para cada método empregado, diferentes valores são produzidos. Valores de referência calculados com base na média e mediana são comuns principalmente na região da Europa e estes foram reproduzidos para o estado do Amazonas, para fins de comparação com valores de referência adotados em outras partes do mundo (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores de referência de qualidade para metais pesados nos solos estudados e parâmetros utilizados na avaliação da qualidade de solos de outras partes do Brasil e do mundo.

	Método estatístico	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Mn	Al	Fe
		mg kg ⁻¹											--- g kg ⁻¹ ---
Amazonas (AM) Presente Estudo	P75	54,90	0,24	0,95	24,05	6,32	1,99	13,02	56,54	18,55	59,40	34,41	25,90
	P90	81,53	0,24	1,29	30,52	9,11	2,76	19,18	83,57	24,04	59,68	47,26	37,23
	Média + 2xDP	102,42	0,24	1,57	38,54	10,95	3,33	21,44	93,89	29,62	82,84	55,58	43,95
	Mediana + 2xDMA	76,55	0,24	1,30	31,96	8,17	2,80	17,77	77,79	25,21	73,65	45,50	38,54
CONAMA (2009)	VP	150,00	1,30	25,00	75,00	60,00	30,00	72,00	-	300,00	-	-	-
CONAMA (2009)	VI	300,00	3,00	35,00	150,00	200,00	70,00	180,00	-	450,00	-	-	-
São Paulo (SP) – CETESB (2014)	P75	75,00	<0,5	13,00	40,00	35,00	13,00	17,00	-	60,00	-	-	-
Minas Gerais (MG) – COPAM (2011)	P75	93,00	0,40	6,00	75,00	49,00	21,50	19,50	129,00	46,50	-	-	-
Rio Grande do Norte (RN) – Preston et al. (2016)	P75	58,91	0,10	15,41	30,94	13,69	19,84	16,18	28,71	23,85	-	-	-
	P90	114,06	0,13	23,41	53,75	23,50	32,90	25,55	42,16	42,44	-	-	-
Mato Grosso do Sul (MS) e Rondônia (RO) Santos e Alleoni (2013)	P75	-	0,30	21,30	44,80	20,60	2,10	9,00	-	3,00	-	-	-
	P90	-	0,30	23,00	59,10	25,90	3,20	12,70	-	9,30	-	-	-
Paraíba (PB) Almeida Jr et al. (2016)	P75	87,96	0,06	7,93	28,81	11,22	9,12	10,01	-	23,46	350,83	-	18,74
	P90	117,41	0,08	13,14	48,35	20,82	14,44	14,62	-	33,65	504,08	-	24,07
Mediterrâneo Europeu - Mico et al. (2007)	Média + 2xDP		0,70	11,00	36,00	28,00	31,00	28,00		83,00	402,00		19,82
Cuba – Alfaro et al. (2014)	P75	111,00	0,60	25,00	153,00	83,00	170,00	50,00	137,00	86,00	1947,00		54,06
Holanda - Brus et al. (2009)	P95	190,00	0,60	15,00	55,00	40,00	35,00	50,00	80,00	140,00			
Espanha - Tume et al. (2006)	Média + 2xDP	272,60			40,80	31,00	29,90	68,10	49,70	132,70			
Grécia – Kanellopoulos e Arygyraki (2013)	Valor Superior	479,00		45,60	626,00	111,00	635,00	97,00	67,00	110,00	1026,00	56,00	48,00
Sérvia - Mrvic et al. (2011)	Média + 2xDP		3,52		52,80	180,00	78,90	75,50		115,00			
	Mediana + 2xDMA		2,55		34,30	33,20	43,80	34,80		61,00			

P75 e P90 – Percentis 75 e 90

Media + 2xDP: Média + 2 x desvio padrão

Mediana + 2xDMA: Mediana + 2 x desvio absoluto mediano

VP – Valor de Prevenção

VI – Valor de Investigação

Valor Superior - Limite superior com base no percentil

3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Atributos químicos e físicos dos solos

A grande variação nos atributos químicos e físicos dos solos analisados, evidenciada pelo coeficiente de variação (CV) dos dados, é reflexo dos diferentes tipos de solos estudados, desde os Latossolos e Argissolos intensamente lixiviados até os Neossolos Flúvicos, que constantemente recebem aporte de nutrientes e minerais oriundos das cheias dos rios (QUESADA et al., 2011; LIMA et al., 2006).

Os solos estudados, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), apresentam uma reação do tipo fortemente ácida (pH 4,3 – 5,3). Essa reação fortemente ácida está relacionada ao processo avançado de intemperismo das rochas e dos solos na região Amazônica (estes são submetidos a uma intensa lixiviação das bases), que também é favorecido pela hidrólise de minerais do tipo 1:1, liberando H^+ no sistema (QUESADA et al., 2010). Este mesmo processo também é responsável pelos baixos teores de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , resultando em uma menor CTC dos solos.

Apesar do baixo conteúdo de matéria orgânica nos solos, que tem como principal fonte os compostos orgânicos de origem vegetal e animal (ex: galhos, folhas, tronco de árvores e animais mortos), este baixo teor é responsável por gerir a fertilidade dos solos em região de floresta, uma vez que esse material, ao se decompor, libera macro e micronutrientes no sistema (BRINKMANN, 1989; CUEVAS, LUGO, 1998; PAUDEL et al., 2015).

A natureza sedimentar predominante no material de origem dos solos analisados reflete nos teores de óxidos de ferro cristalino e total (estes, de maneira geral, são baixos), bem como no conteúdo de argila dos solos, que apresentam uma textura argilosa (EMBRAPA, 2013). Segundo Lima et al. (2006), que conduziram estudos em perfis de solo na Amazônia Ocidental, valores entre 7 e 40 $g\ kg^{-1}$ de ferro extraído com ditionito são considerados baixos e são atribuídos à pobreza em ferro do material de origem dos solos. Em áreas da região Amazônica onde o material de origem difere de sedimentos os teores de ferro extraído com ditionito são elevados, fato este observado por Gualberto et al. (1987) no estado do Pará, onde os teores obtidos foram superiores a 14 %, demonstrando, de forma geral, a natureza de rochas pobres em ferro encontradas no estado do Amazonas.

3.4.2 Teores naturais de metais pesados nos solos estudados e análise multivariada

A variação dos teores de metais nos solos analisados acompanha a diversidade de solos e rochas encontrados na região Amazônica (QUESADA et al., 2010; SILVA-FILHO et al., 2014). No estado do Amazonas há o predomínio de rochas com baixo teor de metais pesados, principalmente nas áreas das bacias sedimentares, onde ocorre a presença de argilitos e arenitos. Por outro lado, as áreas do embasamento cristalino possuem rochas que apresentam um conteúdo maior de metais pesados, dentre elas granitos e gnaisses (REIS, ALMEIDA, 2010). Assim, essa diversidade geológica observada no estado Amazonas é refletida nos coeficientes de variação dos metais pesados nos solos estudados, que são superiores a 100 %.

Os teores máximos de Cr, Cu, Ti e V foram encontrados na amostra 13, pertencente à classe dos Latossolos, o que está relacionado à presença de basalto, material de origem deste solo. Segundo Sultan e Shazili (2009), altas concentrações de cromo são comuns em solos formados de rochas ígneas, como observado nas amostras 8 e 13, respectivamente. Outro aspecto que contribui para os maiores teores destes metais na amostra 13 é seu alto teor de ferro (óxidos de ferro), o que favorece uma maior retenção dos referidos metais no solo por meio de substituição isomórfica e/ou processos de adsorção (SCHWERTMANN, PFAB, 1996; FONTES, GOMES, 2003; THANACHIT et al., 2006).

Os teores mais baixos de metais foram encontrados nas amostras de Espodosolos, o que reflete a baixa concentração de metais no material de origem desses solos (arenitos e/ou depósitos arenosos do Quaternário) e o intemperismo ao qual esses solos foram submetidos durante o processo de pedogênese. Tudo isso contribuiu para a remoção e destruição da argila, com o conseqüente predomínio da fração areia, constituída principalmente por quartzo (HORBE et al., 2004; LUNDSTROM et al., 2000; DUBROEUCQ, VOLKOFF, 1998; NASCIMENTO et al., 2004).

De maneira geral, os teores de metais pesados nos solos estudados seguem o mesmo padrão de distribuição de metais em solos de diferentes locais (ALLOWAY, 2013). Nos solos estudados, os elevados teores médios dos elementos Al, Fe, Ti, Mn e V são reflexo da abundância destes elementos na crosta terrestre. No presente estudo, esses elementos apresentaram sua maior concentração nos solos formados a partir de rochas ígneas, como observado no grupo 1, identificado na análise de componentes principais (Figura 6B).

Estes elementos estão associados principalmente à fração argila, onde, nos solos do estado do Amazonas, há o predomínio de caulinita, illita, seguido por gibbsita, óxidos de ferro (goethita e hematita), óxidos de titânio (anatásio e rutilo) e, em menor quantidade, vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas (dados não apresentados). Por outro lado, menores concentrações de Cu, Ni, Co e Cd refletem os baixos teores destes metais no material de origem dos solos (VALÉRIO et al., 2009).

Além do material de origem, o processo de intemperismo ao qual esses solos foram e estão sendo submetidos também influencia na distribuição dos metais. Na região Amazônica, o grau de intemperismo tende a favorecer o processo de monossilicização, ocasionando, assim, uma maior perda daqueles metais de maior mobilidade no solo (KONHAUSER et al., 1994; MORTATTI, PROBST, 2003; QUESADA et al., 2010). Tal fato está de acordo com os resultados obtidos na análise multivariada, onde foram identificados dois grupos de solos (Figuras 6 e 7). O primeiro grupo é constituído pelos metais Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Zn e Mn, onde estes apresentam suas maiores médias nos solos de várzea. Já o segundo grupo é constituído por Cr, Fe, Ti, V, Zr e Al, relacionados aos solos de terra firme. Em estudos de perfis de solo na região de Coari – Amazonas - Brasil, Horbe et al. (2007) identificaram dois grupos de solos e associaram um deles aos solos de várzea, que apresentavam os maiores teores de elementos de maior mobilidade, tais como Ba, Cu, Ni, e Zn.

A formação de grupos de solos com a presença de elementos de maior e menor mobilidade também foi observada por Schucknecht (2012), em um estudo pedogeoquímico de solos das regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil. Neste estudo, o autor identificou grupos de solos com maiores concentrações dos elementos Al, Fe e Ti e relacionou estes elementos com uma menor mobilidade no solo, tendo em vista a presença destes em óxidos de ferro, minerais primários e secundários, sendo estes resistentes aos processos de intemperismo. Outro grupo de solos foi também identificado pelo autor, onde foram encontrados elementos de maior mobilidade, tais como Ca, K, Mg e Na, que são considerados facilmente lixiviados no perfil do solo.

Conforme os resultados obtidos neste estudo, observa-se a formação de um grupo de metais com maior mobilidade no perfil do solo, tendo estes as suas menores concentrações nos solos de terra firme, os quais possuem as maiores taxas de intemperismo. Burak et al. (2010), em um estudo sobre o comportamento geoquímico de metais pesados em solos de Minas Gerais - Brasil, identificaram uma maior mobilidade para os elementos Co, Ni, Cu, Pb, Mn e Zn e relacionaram este fato ao intenso

intemperismo e lixiviação aos quais os solos foram submetidos. Nael et al. (2009) encontraram a seguinte ordem de mobilização para metais em solos sob floresta no Iran: $Mn > Co > Ni > Zn > Cu > Pb$, enquanto Cr, V e Fe apresentaram baixa mobilidade durante o processo de intemperismo. Já em um estudo sobre adsorção competitiva de metais, Fontes e Gomes (2003) identificaram a seguinte ordem crescente de adsorção: $Cr > Pb > Cu > Ni > Cd > Zn$. Segundo os autores, em solos com baixos sítios de adsorção para metais pesados, a competição entre os metais é intensa e metais que apresentam ligações mais fracas (como Zn, Cd, Ni e Cu) tendem a ter uma menor retenção na fase sólida do solo e são passíveis de maior mobilização no sistema. Esses elementos, de maneira geral, apresentam uma maior mobilidade durante o processo de intemperismo, sendo a mesma favorecida por características intrínsecas dos metais e do solo.

Diante do exposto, infere-se que, durante o processo de mobilização desses metais, parte tende a ficar dissolvida nas águas dos principais rios do estado do Amazonas e parte tende a ser adsorvida nas partículas orgânicas e minerais suspensas nestes rios. Segundo Guyot et al. (2007), Guimarães et al. (2013) e Seyler e Boaventura (2003), 97 % das cargas de partículas encontradas nestes rios são de origem andina, com predomínio de partículas minerais, e, em menor quantidade, matéria orgânica. Os metais que estão em suspensão nas águas tendem a ser adsorvidos por estas partículas, sendo parte carregada para o oceano Atlântico, enquanto a outra parte é submetida ao processo de sedimentação em ambientes de menor energia. Tais ambientes estão geralmente nas áreas de várzea, onde predominam os Gleissolos e Neossolos Flúvicos, onde foram obtidas as maiores concentrações de metais considerados de maior mobilidade.

Outro fator que contribui para a presença destes elementos em maior quantidade nos solos de várzea é a constituição destes sedimentos. Seyler e Boaventura (2003), estudando a concentração de metais em partículas nas águas do rios Negro, Madeira e Solimões, bem como de seus afluentes, encontraram as maiores concentrações de metais nas partículas do rio Solimões e relacionaram este fato à maior contribuição de partículas oriundas da região dos Andes.

Por outro lado, os solos de terra firme apresentam um maior teor de metais de baixa mobilidade no solo, como Fe, Al, Ti, Cr, V e Zr. Os principais solos deste tipo de ambiente no estado do Amazonas são os Argissolos (45 %) e Latossolos (26 %), e, em menor porcentagem, Espodossolos (7 %), Plintossolos (3,5 %) e Cambissolos (1,37 %) (TEIXEIRA et al., 2010).

A maior concentração dos metais Al, Cr e V nos solos de terra firme está relacionada à incorporação destes metais nos óxidos de ferro, por meio de substituição isomórfica, e isso é evidenciado pelas correlações encontradas entre estes elementos e o ferro (Fe x Al: $r = 0,72$, $p < 0,01$; Fe x Cr: $r = 0,75$, $p < 0,01$; Fe x V: $r = 0,87$, $p < 0,01$) (SCHWERTMANN, PFAB, 1996; FONTES, GOMES, 2003; THANACHIT et al., 2006). Nascimento et al. (2004) verificaram em um perfil de Latossolo Amarelo em Manaus – Amazonas – Brasil substituição isomórfica de Fe^{3+} por Al^{3+} , variando de 15 a 33 %. Essa porcentagem de substituição é compatível com a presença de goethita, mineral que tem maior substituição em relação à hematita (SCHWERTMANN, KAMPF, 1985; MELO et al., 2002) e também encontrado no presente estudo.

Os elementos Ti e Zr são considerados de menor mobilidade no solo e estão associados a minerais primários ou secundários de maior resistência aos processos de intemperismo (CORNU et al., 1999; DU et al., 2012). Assim, os maiores teores desses elementos nos solos de terra firme podem estar associados a minerais de maior resistência ao intemperismo na região Amazônica, apresentando, assim, menor mobilidade quando comparados com outros elementos. Du et al. (2012), em um estudo de um perfil laterítico na Austrália Ocidental, encontraram os minerais rutilo (TiO_2), ilmenita ($FeTiO_3$) e zircão ($ZrSiO_4$) e relacionaram a presença destes à maior resistência ao intemperismo e menor mobilidade no perfil do solo.

Esse comportamento para os dois grupos de metais obtidos na análise multivariada também foi encontrado por Konhauser et al. (1994), em um estudo sobre o comportamento de metais pesados e cátions maiores em solos, sedimentos e água na região Amazônica. Horbe et al. (2007), em um estudo de perfis de solo e sedimentos na bacia do rio Solimões (região de Coari – AM), encontraram os maiores teores de elementos de menor mobilidade nas áreas de colina, enquanto os elementos de maior mobilidade foram concentrados nos sedimentos recém expostos durante o período Quaternário e nos solos de várzea.

3.4.3 Valores de referência de qualidade (VRQ's) para metais pesados nos solos do estado do Amazonas

Os VRQ's para metais pesados em solos são considerados uma importante ferramenta no monitoramento e avaliação da qualidade do solo (BRUS et al., 2009). Esse monitoramento, em casos de uma possível contaminação ambiental, é realizado, em

primeira instância, com a comparação entre os valores de referência de qualidade do solo (não poluído ou minimamente poluído) e os valores determinados. Caso seja observado que tais valores estão acima dos valores de referência de qualidade pré-determinados, medidas serão adotadas para evitar a perda das funções do solo (BIRANI et al., 2015; CONAMA, 2009). Para a escolha dos valores de referência de qualidade no Brasil, o CONAMA sugere que tais parâmetros sejam determinados ou estabelecidos com base nos percentis 75 (P75) ou 90 (P90), sendo a escolha final sobre qual VRQ se adotar feita de acordo com a necessidade de cada agência ambiental estadual (CONAMA, 2009).

No presente estudo, os VRQ's determinados com base no P90 para todos os elementos, com exceção do Mn, foram superiores aos VRQ's determinados com base no P75 (Tabela 8). Este fato também foi observado por Paye et al. (2010) no estabelecimento dos VRQ's para os solos do estado do Espírito Santo - Brasil.

Segundo Santos e Alleoni (2013), ao se utilizar o P75, exclui-se 25 % dos valores mais elevados dos metais, que podem ser considerados anomalias. Assim, assume-se um caráter mais restritivo diante das atividades antrópicas, responsáveis pela emissão de metais pesados, sendo, portanto, mais conservativo, o que garante uma maior segurança ambiental. Segundo Paye et al. (2007), a adoção do valor P75 como VRQ não é traduzida em uma maior segurança ambiental, uma vez que o número de solos suspeitos de contaminação aumenta, quando estes, na verdade, estão apresentando seus valores naturais. Segundo os mesmos autores, quando situações como essa ocorrem, a opção de se adotar vários VRQ's para diferentes solos no mesmo estado pode ser mais sensata, evitando, dessa forma, prejuízos na qualidade do solo.

No entanto, ao se adotar VRQ's mais restritivos, tem-se como objetivo uma maior preservação do solo e de suas funções, o que parece mais razoável, tendo em vista que possíveis contaminações podem gerar grandes danos ambientais. Em um estudo sobre a determinação da concentração natural de metais pesados ou elementos potencialmente tóxicos em solos urbanos na Inglaterra, Rothwell e Cooke (2015) compararam dois métodos estatísticos para a determinação desses teores naturais e sugeriram que o método que proporcionasse os valores mais conservativos deveria ser adotado.

Os VRQ's determinados com base nos percentis P75 e P90 foram inferiores aos valores de prevenção (VP) e investigação (VI) adotados pela legislação brasileira (Tabela 8). Tal fato indica que estes teores naturais não representam, de maneira geral, riscos à qualidade e às funções dos solos da região Amazônica, bem como riscos à saúde humana, conforme diretrizes do CONAMA (CONAMA, 2009).

Tendo em vista que os VRQ's estabelecidos com base no P75 representam uma maior segurança ambiental e sendo o mesmo adotado por diversas agências estaduais ambientais no Brasil, este será aqui utilizado na discussão e comparação com outros VRQ's já publicados em âmbito nacional.

Os valores de referência de qualidade dos elementos Ba, Co, Cr, Cu e Ni, quando comparados com os VRQ's estabelecidos nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Norte, Mato Grosso do Sul / Rondônia e Paraíba, apresentam valores menores. Tal fato reflete à natureza do material de origem e dos solos do estado do Amazonas e a maior intensidade do intemperismo e lixiviação que ocorrem nesta região. Os maiores VRQ's observados para os solos destes estados para tais elementos estão, portanto, associados ao material de origem desses solos, que, de maneira geral, são derivados de rochas ígneas ou metamórficas (SANTOS, ALLEONI, 2013; PRESTON et al 2014; SOUZA et al., 2015; ALMEIDA Jr et al., 2016).

Os VRQ's estabelecidos para os solos da região Amazônica apresentaram valores inferiores para todos os elementos quando comparados com os valores obtidos por Kanellopoulos e Argyraki (2013), para áreas em um complexo geológico de rochas dos tipos ultramáficas e metamórficas na Grécia. Segundo os autores, a geologia complicada da região influencia nestes teores elevados, dificultando, dessa forma, a definição de uma estimativa de *baseline*. Neste caso, a utilização de um único valor poderia levar a conclusões erradas, sendo a definição de diferentes valores, de acordo com o material de origem dos solos, a melhor forma para reduzir qualquer exagero nos valores de *baseline*.

Mrvic et al. (2011) determinaram o *background* para metais pesados em solos da Sérvia usando diferentes métodos estatísticos e não estatísticos e encontraram diferentes resultados para cada método utilizado. Dentre os métodos empregados pelos autores, dois deles são amplamente utilizados na determinação do *background* de metais: [*Mean* + 2SD] e [*Median* + 2MAD], nos quais são usados os valores da média (*Mean*), mediana (*Median*), desvio padrão (SD) e o desvio absoluto mediano (MAD). Os valores obtidos para o estado do Amazonas, tendo como base esses dois procedimentos, são inferiores quando comparados com os valores obtidos pelos autores para os solos da Sérvia, com exceção do Cr, que apresentou resultados semelhantes. Essas diferenças estão relacionadas à ocorrência de rochas ígneas, metamórficas e material calcário nessa região da Europa.

Levando-se em consideração os valores obtidos por Micó et al. (2007) na determinação dos valores de base (*baseline*) para a avaliação do grau de contaminação de solos da região Mediterrânea na Europa e os valores obtidos neste estudo para o estado do Amazonas, observou-se que somente os valores de ferro foram superiores aos encontrados pelos referidos autores.

Utilizando-se os diferentes métodos de determinação de valores de referência para solos da Europa e aplicando-os para os solos estudados, observa-se que, de maneira geral, os valores aqui obtidos foram inferiores. Tal fato está relacionado ao material de origem dos solos analisados, uma vez que este apresenta rochas com baixos teores de metais, e aos processos intensos de pedogênese aos quais estes solos foram e estão sendo submetidos.

3.4.4 Proposição de valores de referência de qualidade para metais pesados em solos de áreas de terra firme e várzea

Levando-se em consideração as diretrizes da resolução n° 420/2009 do CONAMA (CONAMA, 2009), cada Estado da Federação Brasileira pode definir um único VRQ por metal ou um VRQ por metal para cada tipo de solo.

A proposição de um único VRQ por metal para todos os solos do estado do Amazonas poderia abranger solos de diferentes ambientes (nesse caso, os de terra firme e várzea), onde cada ambiente, em virtude de suas principais características, possui a sua própria dinâmica de metais. Assim, esse estudo traz uma proposição de dois VRQ's, um para as áreas consideradas de terra firme e outro para áreas parcialmente alagadas ou várzeas, e estes foram comparados com o VRQ geral, calculado para os solos do estado de maneira geral (Tabela 9).

Confrontando os VRQ's obtidos para os solos de terra firme e de várzea com o VRQ geral (Tabela 8), observa-se que os percentis P75 e P90 das áreas de terra firme são bem próximos dos percentis obtidos para o VRQ geral. No entanto, verifica-se que os VRQ's de grande parte dos metais, com exceção do V, Al e Fe, são bem superiores nos solos de várzea quando comparados aos demais. O VRQ obtido para o elemento Ba, por exemplo, foi de 150,07 mg kg⁻¹ nos solos de várzea, enquanto que, para os solos de terra firme, o valor foi de 47,91 mg kg⁻¹.

Tabela 9 – Valores de referência de qualidade para metais pesados nos solos dos principais ambientes de ocorrência deste estudo.

Metal	Solos de terra firme		Solos de várzea		VRQ Geral*			
	P75	P90	P75	P90	P75	P90	VP**	VI**
Ba	47,91	74,40	150,07	160,73	54,90	81,53	150	300
Cd	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	1,3	3
Co	0,93	1,17	12,87	13,53	0,95	1,29	25	35
Cr	18,50	26,33	28,77	30,35	24,05	30,52	75	150
Cu	4,42	7,03	33,79	37,12	6,32	9,11	60	200
Ni	1,99	2,76	22,36	24,06	1,99	2,76	30	70
Pb	10,67	14,84	19,63	19,78	13,02	19,18	72	180
V	60,29	87,05	56,00	59,00	56,54	83,57	-	-
Zn	17,59	23,54	103,27	108,14	18,55	24,04	300	450
Mn	59,43	59,68	362,45	525,70	59,40	59,68	-	-
Al	41,90	53,13	31,06	36,63	34,41	47,26	-	-
Fe	25,13	37,60	31,30	32,93	25,90	37,23	-	-

*Referentes aos solos de terra firme e de várzea.

**VP – Valor de prevenção; VI – Valor de investigação (CONAMA, 2009).

O comportamento diferenciado de determinados metais, observado com o cálculo dos teores médios de metais e pelo uso da análise multivariada, foi a base para a proposição de dois VRQ's para os estudados. A necessidade de um VRQ específico para os solos de várzea está relacionada à dinâmica de metais nesse tipo de ambiente, a qual é facilmente modificada por ações antrópicas, que podem gerar grandes prejuízos ambientais, tendo em vista que estas áreas são consideradas como acumuladores de metais pesados (ROSOLEM et al., 2015; MARTIN, 2009; LAING et al., 2009).

No estado do Amazonas, as áreas de várzea representam cerca de 9 % dos solos do estado e são nessas áreas que grande parte da população da zona rural é encontrada. Além disso, os solos de várzea têm grande relevância econômica, tendo em vista que, após os períodos das cheias e com o novo aporte de nutrientes, são realizadas atividades agrícolas, principalmente aquelas de ciclo curto, como a produção de feijão, milho e melancia.

As áreas de terra firme são mais expressivas no estado e são representadas principalmente por solos de ambiente aerados, com predomínio das classes dos Latossolos e Argissolos. Nestes ambientes, a dinâmica dos metais é menos propícia a problemas ambientais, tendo em vista que são áreas estáveis da paisagem e mais resistentes a mudanças de ordem natural. Diferentemente das áreas de várzea (que funcionam como áreas acumuladoras, de maneira geral, para poluentes), as áreas de terra

firme são consideradas como ambientes fontes de poluentes, sendo estes oriundos dos processos de intemperismo (no caso, metais pesados) ou de ações antropogênicas (para substâncias orgânicas e inorgânicas). Rosolem et al. (2015), em estudos sobre metais pesados e substâncias orgânicas em solos do estado de Minas Gerais, identificaram que teores elevados de As, Cr e Cu em solos de várzea estavam associados a atividades agrícolas praticadas nas partes mais elevadas do ambiente.

Este tipo de critério, baseado na distinção de ambientes, foi adotado por Kanellopoulos e Argyraki (2013) em solos sobre formações geológicas complexas na Grécia. No estudo, os autores identificaram três grupos de metais pesados e os relacionaram com os distintos ambientes de formação geológica da região. Assim, propuseram a determinação de três valores naturais de metais pesados, objetivando promover o estabelecimento de políticas de conservação dos solos no nordeste da Grécia compatíveis com o ambiente de formação dos solos. Para os autores, a definição de um único valor de *baseline* poderia conduzir a decisões errôneas, onde algumas áreas poderiam apresentar valores superestimados e outras áreas valores inferiores aos reais.

Rothwell e Cooke (2015), em um estudo de comparação de métodos para a definição do *background* geoquímico para elementos potencialmente tóxicos em solos urbanos na Inglaterra, afirmaram que a adoção de um único valor de *background* geoquímico é considerada inapropriada. Os autores apontam que em áreas urbanas os teores de metais pesados podem ser elevados em virtude de atividades antrópicas.

A escolha de determinado ambiente e a proposição de VRQ's para o mesmo, também foi realizado no Brasil, onde Abreu Lima et al. (2016) indicam a necessidade de um estudo detalhado para a classe dos Organossolos. Os autores apontam para a maior fragilidade desses solos em relação aos solos de outros ambientes, tendo em vista que estão sujeitos a rápidas mudanças com seu uso, podendo assim ocasionar sérios problemas ambientais.

3.5 CONCLUSÕES

Os teores de metais pesados nos solos estudados apresentam valores baixos quando comparado com outros valores do Brasil e de outros países. Esses baixos teores de metais estão relacionados principalmente ao material de origem dos solos, que são formados predominantemente sobre rochas sedimentares pobres em metais.

Entre os ambientes estudados, os solos de várzea apresentaram os maiores teores médios de Ba, Pb, Co, Zn, Ni, Co e Mn. Já os elementos Cr, V, Fe, Ti, Zr e Al apresentaram seus maiores teores nos solos de terra firme, sendo as maiores concentrações obtidas nos Latossolos.

Essa diferenciação quanto aos teores de metais entre os solos de terra firme e de várzea implica na necessidade de formulação de dois VRQ's por metal para os solos do estado do Amazonas, considerando a distribuição de metais pesados nesses ambientes distintos. A definição de dois VRQ's por metal pode contribuir para o fortalecimento das políticas públicas de proteção ambiental dos solos do estado, o que, conseqüentemente, será benéfico para a conservação da Floresta Amazônica e seus serviços ambientais.

REFERÊNCIAS

- ALLOWAY B. J., TREVORS J. T., 2013. **Heavy Metals in Soils-Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability**. New York: Springer Dordrecht Heidelberg.
- ALMEIDA JR, A. B. D.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; BIONDI, C. M.; SOUZA, A. P. D.; BARROS, F. M. D. R. Background and Reference Values of Metals in Soils from Paraíba State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1 – 13, 2016.
- ALFARO, M. R., MONTERO, A., UGARTE, O. M., DO NASCIMENTO, C. W. A., ACCIOLY, A. M., BIONDI C. M., DE SILVA, Y. J. A. B., 2015. Background concentrations and reference values for heavy metals in soils of Cuba. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, p. 4198, 2015.
- BIRANI, S. M.; FERNANDES, A. R.; DE SOUZA BRAZ, A. M. S.; PEDROSO, A. J. S.; ALLEONI, L. R. F. Available contents of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon. **Chemie der Erde – Geochemistry**, v. 75, p. 143-151, 2015
- BRINKMANN, W. L. F. System propulsion of an Amazonian Lowland Forest: an outline. **GeoJournal**, v. 19, p. 369 – 380, 1989.
- BRUS, D.J.; LAMÉ, F.P.J.; NIEUWENHUIS, R.H. National baseline survey of soil quality in the Netherlands. **Environmental Pollution**, v.7, p. 2043 - 2052, 2009.
- BURAK, D.L., FONTES, M.P.F., SANTOS, N.T., MONTERIRO, 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**, v. 160, p. 131–142, 2010.
- CAMPOS, M. C. C., RIBEIRO, M. R., SOUZA JÚNIOR, V. S., RIBEIRO FILHO, M. R., SOUZA, R. V. C. C., ALMEIDA, M. C. Mineralogical characteristics of oxisols and ultisols in Southern Amazonas. *Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais*, v. 9, p. 1 – 7, 2011.
- CETESB, 2014. **Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea no Estado de São Paulo 2014** <http://solo.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2014/12/valores-orientadores-nov-2014.pdf> Acesso em Maio, 2016.
- CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & RONDÓN, M.A. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C.E.P (Org). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York, Haworth, 2006. p. 245-266.
- CHEN, M.; MA, L. Q.; HARRIS, W. G. Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 28, p. 1173– 1181, 1999.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado do Amazonas**. 2006. http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_amazonas.pdf Acesso em Junho, 2016.

CONAMA – **CONSELHO NACIONAL DE MEIOR AMBIENTE**, 2009. Resolução nº 420/2009. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf> Acesso em Janeiro, 2016.

COPAM – **CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL**, 2011. Deliberação Normativa Nº 166 de 2011. Disponível em <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414> Acesso em Agosto, 2016.

CORNU, S., LUCAS, Y., LEBON, E., AMBROSI, J.P., LUZIAO, F., ROUILLER, J., BONNAY, M., NEAL, C. Evidence of titanium mobility in soil profiles, Manaus, central Amazonia. **Geoderma**, v. 91, p. 281–295, 1999.

CUEVAS, E., LUGO, A.E. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species. **Forest Ecology and Management**, v. 112, p. 263 –279, 1998.

DU, X., RATE, A.W., GEE, M.M. Redistribution and mobilization of titanium, zirconium and thorium in an intensely weathered lateritic profile in Western Australia. **Chemical Geology**, v. 330, p. 101 – 115, 2012.

DUBROEUCQ, D., VOLKOFF, B. From Oxisols to Spodosols and Histosols, evolution of the soil mantles in the Rio Negro Basin (Amazonas). **Catena**, v. 32, p. 245 – 280, 1998.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2º ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, Rio de Janeiro. 230 p. 2011.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. Brasília, DF; 2013.

FEARNSIDE, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. **Conservation Biology**, v. 19, p. 680–688, 2005

FERREIRA, A. M. M.; SALATI, E. Forças de transformação do ecossistema Amazônico. **Estudos Avançados**, v. 19, p. 25 – 44, 2005.

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

GUALBERTO, V., RESENDE, M., CURI, N. Química e mineralogia de Latossolos, com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 245- 252, 1987.

GUIMARÃES, S. T., LIMA, H. N., TEIXEIRA, W. G., NEVES JÚNIOR, A. F., SILVA, F. W. R., MACEDO, R. S., SOUZA, K. W. Caracterização e classificação de Gleissolos da várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317 – 326, 2013.

GUYOT, J.L.; JOUANNEAU, J.M.; SOARES, L.; BOAVENTURA, G.R.; MAILLET, N.; LAGANE, C. Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. **Catena**, v. 71, p. 340–356.

HERNANDEZ, L.; PROBST, A.; PROBST, J. L.; ULRICH, E. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. **Science of Total Environment**, v. 312, p. 195 – 219, 2003.

HORBE, A.M.C., PAIVA, M.R.P, MOTTA, M.B., HORBE, M.C. Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari - AM, Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 81 – 90, 2007.

HORBE, A.M.C., HORBE, M.A., KENITIRO, S. Tropical spodosols in northeastern Amazonas state, Brazil. **Geoderma**, v. 119, p. 55 – 68, 2004.

IBGE. **Geoestatísticas de Recursos Naturais da Amazônia Legal**. 2003. Estudos e Pesquisas, Informações Geográficas no 8. Rio de Janeiro, R.J. 2011.

IBGE. Perfil do Estado do Amazonas. 2016. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/Estadosat/perfil.php?sigla=am>.> Acesso em: 21 jan. 2016.

IBGE. Mapa de Solos do Estado do Amazonas. 2010a.
ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/pedologia/unidades_federacao/am_pedologia.pdf Acesso em 28 de Junho de 2016

IBGE. Mapa de Vegetação do Estado do Amazonas. 2010b
ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/vegetacao/unidades_federacao/am_vegetacao.pdf Acesso em 19 de Maio de 2016.

KANELLOPOULOS, C., ARGYRAKI, A. Soil baseline geochemistry and plant response in areas of complex geology. Application to NW Euboea, Greece. **Chemie der Erde – Geochemistry**, v. 73, p. 519 – 532, 2013.

KIRPICHCHIKOVA, T.A.; MANCEAU, A.; SPADINI, L.; PANFILI, F.; MARCUS, M.A.; JACQUET, T. Speciation and solubility of heavy metals in contaminated soil using Xray microfluorescence, EXAFS spectroscopy, chemical extraction, and thermodynamic modeling. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 70, p. 2163 – 2190, 2006.

KONHAUSER, K., FYFE, W., KRONBERG, B. Multi-element chemistry of some Amazonian waters and soils. **Chemical Geology**, v. 111, p. 155–175, 1994.

LI, Z.; FENG, X.; LI, G.; BI, X.; ZHU, J.; QIN, H.; DAI, Z.; LIU, J.; LI, Q.; SUN, G. Distributions, sources and pollution status of 17 trace metal/metalloids in the street dust of a heavily industrialized city of central China. **Environment Pollution**, v. 182, p. 408–416, 2013.

LIMA, H.N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 176p. (Tese de Doutorado).

- 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 topossequência da bacia sedimentar do alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 59 – 68, 2006.
- LUNDSTRÖM, U.S., VAN BREEMEN, N., BAIN, D. The podzolization process. A review. **Geoderma**, v. 94, p. 91–107. 2000.
- MARQUES, J. J. G. S. M., TEIXEIRA, W. G.; SCHULZE, D. G., CURTI, N. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon Region. **Clay Mineralogy**, v. 37, p. 651 – 661, 2002.
- MCKEAGUE, J. A., DAY, J. H. Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canada Journal Soil Science**, v. 46, p. 13-22, 1966.
- MEHRA, O. P., JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Mineral**, v. 7, p. 317 – 327, 1960.
- MELO, V.F., SCHAEFER, C.E.G.R., SINGH, B., NOVAIS, R.F., FONTES, M.P.F. Propriedades químicas e cristalográficas da caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do grupo barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 53–64, 2002.
- MORTATTI, J., PROBST, J.L. Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO₂ uptake in the Amazon Basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations. **Chemical Geology**, v. 197, p. 177–196, 2003.
- MRVIĆ, V., KOSTIĆ-KRAVLJANAC, L., ČAKMAK, D., SIKIRIĆ, B., BREBANOVIĆ, B., PEROVIĆ, V., NIKOLOSKI, M. Pedogeochemical mapping and background limit of trace elements in soils of Branicevo Province (Serbia). **Journal of Geochemical Exploration**, v. 109, p. 18–25, 2011.
- NAEL, M., KHADEMI, H., JALALIAN, A., SCHULIN, R., KALBASI, M., SOTOHIAN, F. Effect of geopedological conditions on the distribution and chemical speciation of selected trace elements in forest soils of western Alborz, Iran. **Geoderma**, v. 152, p. 157–170, 2009.
- NASCIMENTO N., BUENO G., FRITSCH E., HERBILLON A., ALLARD T., MELFI A., ASTOLFO R., BOUCHER H. AND LI Y. Podzolization as a deferralitization process: A study of an Acrisol–Podzol sequence derived from Palaeozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. **European Journal of Soil Science**, v. 55, p. 523–538, 2004.
- PAYE H. S.; MELLO J. W. V.; ABRAHÃO, W. A. P.; FERNANDES FILHO, E. I.; DIAS, L. C. P.; CASTRO M. L. O.; MELO, S. B.; FRANÇA, M. M. Reference quality values for heavy metals in soils from Espírito Santo State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 2041-2051, 2010.

PAUDEL, E., DOSSA, G. G. O., XU, J., HARRISON, R. D. Litterfall and nutrient return along a disturbance gradient in a tropical montane forest. **Forest Ecology and Management**, v. 353, p. 97–106, 2015.

PRESTON, W.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; SILVA, W. R.; FERREIRA, H. A. Quality reference values for heavy metals in soils of Rio Grande do Norte, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 2041-51, 2014.

QUESADA, C. A., LLOYD, J., SCHWARZ, M., PATIÑO, S., BAKER, T. R., CZIMCZIK, C., FYLLAS, N. M., MARTINELLI, L., NARDOTO, G. B., SCHMERLER, J., SANTOS, A. J. B., HODNETT, M. G., HERRERA, R., LUIZ'AO, F. J., ARNETH, A., LLOYD, G., DEZZEO, N., HILKE, I., KUHLMANN, I., RAESSLER, M., BRAND, W. A., GEILMANN, H., MORAES FILHO, J. O., CARVALHO, F. P., ARAUJO FILHO, R. N., CHAVES, J. E., CRUZ JUNIOR, O. F., PIMENTEL, T. P., AND PAIVA, R. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1515–1541, 2010.

QUESADA, C.A., LLOYD, J., ANDERSON, L.O., FYLLAS, N.M., SCHWARZ, M., CZIMCZIK, C.I. Soils of Amazonia with particular reference to the rainfor sites. **Biogeosciences**, v. 8, p. 1415–1440, 2011.

RAMMIG, A.; JUPP, T.; THOMICKE, K.; TIETJEN, B.; HEINKE, J.; OSBERG, S.; LUCHT, W.; CRAMER, W.; COX, P. Estimating the risk of Amazonian forest dieback. **New Phytologist**, v. 187, p. 694 – 706, 2010.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRET, R. G. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. **Science of Total Environment**, v. 346, p 1 – 16, 2005.

REIS, N. J, ALMEIDA, M. E. Arcabouço Geológico. In: MAIA, M.A.M.; MARMOS, J.L., eds. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus, CPRM, 2010. p.17-26.

ROTHWELL, A. K.; COOKE, M. P. A comparison of methods used to calculate normal background concentrations of potentially toxic elements for urban soil. **Science of the total environment**, v. 532, 625 – 634, 2015.

SALMINEN, R.; TARVAINEN, T. The problem of defining geochemical baselines. A case study of selected elements and geological materials in Finland. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 60, p. 91 – 98, 1997.

SANTOS, S.N.; ALLEONI, L. R. F. Reference values for heavy metals in soils of the Brazilian agricultural frontier in Southwestern Amazonia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 185, p. 5737 -5748, 2013.

SCHUCKNECHT, A., MATSCHULLAT, J., CARITAT, P., SILVA, J., MELO JR, G., PLEBOW, A., MELLO, J. W. V. Pedogeochemistry in NE-Brazil — compared to Australia and Europe. **Science Total Environment**, v. 438, p. 342–356, 2012.

SEYLER, P., BOAVENTURA, G.R. Distribution and partition of trace metals in the Amazon Basin. **Hydrological Processes**, v. 17, p. 1345–1361, 2003.

SILVA-FILHO, E. V., MARQUES, E. D., VILA, M., GOMES, O. V. O., SANDERS, C. J., KUTTER, V. T. Distribution of trace metals in stream sediments along the Trans-Amazonian Federal Highway, Para State, Brazil. **Journal South American Earth Sciences**, v. 54, p. 182–195, 2014.

SIOLI, H. **Amazônia fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais**. Instituto Max-Planck de Limnologia. Editora Vozes Ltda, Petrópolis, RJ. 72pp. 1990.

STANKOVIC, S., KALABA, P., STANKOVIC, A.R. Biota as toxic metal indicators. **Environmental Chemistry Letters**, v. 12, p. 63 – 84, 2014

SULTAN, K., SHAZILI, N.A. Distribution and geochemical baseline of major, minor and trace elements in tropical topsoils of the Terengganu River basin, Malaysia. **Journal Geochemical Exploration**, v. 103, p. 57–68, 2009.

SCHWERTMANN, U., KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, v.139, p. 344–350, 1985.

SCHWERTMANN, U., PFAB, G. Structural vanadium and chromium in lateritic iron oxides: genetic implications. **Geochimica et cosmochim Acta**, v. 60, p. 4279–4283, 1996.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Method 3051A - Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils**. 1998b. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3051a.pdf> Acesso Fevereiro, 2014.

TEIXEIRA, W.G., ARRUDA, W., SHINZATO, E., MACEDO, R.S., MARTINS, G.C., LIMA, H. N., RODRIGUES, T.E. Solos do Estado do Amazonas. In: MAIA, M.A.M.; MARMOS, J.L., Eds. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus, CPRM, 2010. p.71-86.

THANACHIT, S., SUDDHIPRAKARN, A., KHEORUEROMNE, I., GIKES, R.J. The geochemistry of soils on a catena on basalt at Khon Buri, northeast Thailand. **Geoderma**, v. 135, p. 81–96, 2006.

TENG, Y., NI, S., WANG, J., NIU, L. Geochemical baseline of trace elements in the sediment in Dexing Area, South China. **Environmental Geology**, v. 57, p. 1646–1660, 2009.

TUME, P., BECH, J., LONGAN, L., TUME, L., REVERTER, F., BECH, J., SEPULVEDA, B. Baseline concentrations of potentially toxic elements in natural surface soils in Torrelles (Spain). **Environmental Forensics Journal**, v. 7, p. 369–375, 2006.

VALÉRIO, C. S., SOUZA, V. S., MACAMBIRA, M. J. B. The 1,90–1,88 Ga magmatism in the southernmost Guyana Shield, Amazonas Brazil: geology, geochemistry, zircon geochronology, and tectonic implications. **Journal South American Earth Sciences**, v. 28, p. 304–320, 2009.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C. **Amazônia seus solos e outros recursos naturais. Ed. Agronômica.** Ceres. São Paulo. 416 pp. 1987.

VOUTSA, D., SAMARA, C. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas. **Atmospheric Environment**, v.36, p. 3583 – 3590, 2002.

WEI, B., YANG, L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. **Microchemical Journal**, v. 94, p. 99–107, 2010.

WUANA, R.A., OKIEIMEN, F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. **ISRN Ecol.** 2011.

4 **CAPÍTULO 3 - BIOACESSIBILIDADE E AVALIAÇÃO DE RISCO PARA SAÚDE HUMANA DE CROMO EM UM SOLO NA FLORESTA AMAZÔNICA - BRASIL**

RESUMO

Os teores naturais de metais pesados em solos geralmente não representam riscos à saúde humana, tendo em vista seus baixos valores. Entretanto, solos formados sobre materiais rochosos ricos em metais podem ocorrer no ambiente, podendo apresentar metais em concentrações consideradas anômalas. No estado do Amazonas – Brasil, foi identificado em um trecho da Floresta Amazônica um solo com teores de cromo acima de 1500 mg kg⁻¹. Neste local, trabalhadores que atuaram na abertura da BR-307 apresentaram sintomas semelhantes aos de intoxicação por metais. O objetivo do presente estudo foi identificar as formas de Cr presentes nesse solo, quantificar os teores de Cr⁶⁺ e avaliar a exposição a esses teores de cromo em cenários de situações cancerígenas e não cancerígenas. Para isso, foram realizadas extrações sequenciais de Cr, extração alcalina para quantificação de Cr⁶⁺ e ensaios de bioacessibilidade de Cr em diferentes tamanhos de partículas do solo. Os resultados da extração sequencial mostraram que as frações de maior mobilidade no solo (solúvel-trocável e adsorvida às superfícies dos minerais) não apresentaram teores elevados de Cr. Somente a fração associada aos óxidos de Fe e a residual apresentaram teores elevados do metal, representando um potencial de mobilidade do Cr se condições ambientais forem alteradas. Os teores pseudo-totais de Cr obtidos em partículas de diferentes tamanhos no solo foram semelhantes, não sendo observado incremento significativo nos teores do metal com a diminuição do tamanho das partículas. Os teores de Cr⁶⁺ nas partículas estudadas apresentaram médias de 716 e 2050 µg kg⁻¹ (em superfície e subsuperfície, respectivamente). Os teores bioacessíveis de Cr em soluções gástricas e pulmonares foram maiores nas partículas de menores tamanhos. A avaliação de risco indicou que uma exposição diária de Cr de 2020 mg kg⁻¹ resulta em uma ingestão diária média maior que a dose de referência oral diária do metal, sendo suficiente para ser considerada como de risco à saúde humana.

Palavras-chave: Cromo; bioacessibilidade; avaliação de risco.

BIOACCESSIBILITY AND RISK ASSESSMENT FOR HUMAN HEALTH OF THE CHROME IN A SOIL IN THE AMAZONIAN FOREST – BRAZIL

ABSTRACT

Natural levels of heavy metals in soils generally do not pose risks to human health, considering their low values. However, soils formed on rocky materials rich in metals can occur in the environment, and may present metals in concentrations considered anomalous. In the state of Amazonas - Brazil, a soil with chromium contents above 1500 mg kg⁻¹ was identified in a section of the Amazon Forest. At this site, workers who performed the opening of the BR-307 presented symptoms similar to those of metal intoxication. Objective of the present study was to identify the Cr forms present in soil, to quantify Cr⁶⁺ contents and to evaluate the exposure to these chromium contents in scenarios of carcinogenic and non-carcinogenic situations. For this, sequential Cr extractions, alkaline extraction for Cr⁶⁺ quantification and Cr bioaccessibility assays were performed in different soil fraction sizes. Results of the sequential extraction showed that the fractions soil mobile (soluble-exchangeable and adsorbed to the mineral surfaces) did not present high levels of Cr. Only the fraction associated with Fe and residual oxides presented high levels of the metal, representing a potential of Cr mobility if environmental conditions were altered. Pseudo-total contents of Cr obtained in different soil fraction sizes were similar, not being observed a significant increase in the contents of the metal with the decrease of the size of the particles. Concentrations of Cr⁶⁺ in the soil fraction presented averages of 716 and 2050 µg kg⁻¹ (surface and subsurface, respectively). Bioaccessible levels of Cr in gastric and pulmonary solutions were higher in the smaller particles. Risk assessment indicated that a daily Cr exposure of 2020 mg kg⁻¹ results in an average daily intake greater than the daily oral reference dose of the metal and is sufficient to be considered as a human health risk.

Keywords: Chromium, bioaccessibility; human health risk assessment

4.1 INTRODUÇÃO

O cromo (Cr) ocorre naturalmente no ambiente e sua concentração no solo está principalmente relacionada ao material de origem. A concentração média de Cr em solos de diversas parte da Terra é estimada em 54 mg kg^{-1} (MA, HOODA, 2010). No entanto, altas concentrações desse metal ($60,000 \text{ mg kg}^{-1}$) são encontradas em solos formados a partir de rochas ultramáficas, enquanto concentrações mais baixas (5 mg kg^{-1}) são identificadas principalmente em solos formados sobre rochas sedimentares (OZE et al., 2004; GONNELLI, RENELLA, 2012).

O elemento Cr é encontrado no ambiente principalmente nas formas trivalente (Cr^{3+}) e hexavalente (Cr^{6+}) e ambas apresentam propriedades químicas e tóxicas distintas. O Cr^{3+} é frequentemente encontrado no solo como $\text{Cr}(\text{OH})_3$ e Cr_2O_3 . As duas formas apresentam baixa mobilidade no solo, sendo facilmente adsorvidas pelas cargas negativas, e também apresentam facilidade de complexação com a matéria orgânica (FENDORF, ZASOSKI, 1992; APTE et al., 2006). Além disso, o Cr^{3+} é amplamente conhecido como um elemento benéfico em baixas concentrações e tem um papel essencial no metabolismo de seres humanos e animais (CEFALU, HU, 2004; EASTMOND et al., 2008).

Já o cromo hexavalente é encontrado principalmente como espécie “aniônica” (CrO_4^{2-} , HCrO_4^- e $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), sendo fracamente adsorvido por compostos dos solos, tornando-se, assim, móvel no sistema (FENDORF, 1995; KOZUH et al., 2000). A ocorrência de Cr^{6+} no ambiente é favorecida por reações de oxidação a partir do Cr^{3+} , na presença de oxigênio e dióxidos de manganês (FERDORF, ZASOSKI, 1992). Compostos de cromo (VI) são extremamente tóxicos e perigosos, pois se assemelham estruturalmente a sulfatos (SO_4^{2-}) e fosfatos (PO_4^{2-}), sendo ativamente transportados para dentro das células do corpo, favorecendo assim o aparecimento de doenças severas, como câncer (COSTA, 1997).

Sabe-se que avaliações de riscos a saúde humana constituem uma ferramenta importante, uma vez que fornecem informações sobre uma estimativa de impacto de substâncias tóxicas sobre a saúde humana (quando tais substâncias são lançadas e liberadas no ambiente e entram em contato com os seres humanos) (MA et al., 2007; WANG et al., 2011).

Os valores de metais pesados usados pelas agências reguladoras para fins de avaliação de risco à saúde são baseados no pressuposto de que toda a concentração do

elemento presente no ambiente será prontamente absorvida pelo organismo (RUBY et al., 1999; COX et al., 2013). No entanto, é importante observar que somente a fração biodisponível de metais pesados presentes no solo ou de um determinado contaminante pode ser absorvida, seja por via oral, respiratória ou por contato com a pele (RUBY et al., 1999; COX et al., 2013). Uma vez absorvida, esta fração biodisponível pode acarretar uma série de sintomas em organismos vivos, desde reações de irritação na pele, bem como levar a danos maiores à saúde. Nesse contexto, estudos de bioacessibilidade têm sido empregados para uma melhor avaliação desta fração biodisponível de metal e/ou contaminante no solo quando ingerida e submetida aos processos digestivos.

Segundo Ruby et al. (1996), o termo bioacessibilidade é usado para definir a fração de um teor total de um determinado elemento (metal pesado ou substância tóxica) presente no solo e que pode ser dissolvido no estômago, tornando-se posteriormente disponível para absorção durante a passagem pelo intestino delgado. Estudos *in vitro* sobre bioacessibilidade são mais rápidos, baratos e geralmente apresentam respostas satisfatórias quando comparados com estudos *in vivo* (JUHASZ et al., 2007). Este tipo de estudo também está sendo utilizado na simulação de fluídos pulmonares, tendo em vista que, após inalação, determinados compostos podem ser solubilizados, podendo ocasionar sérios danos ao sistema respiratório (VOUTSA, SAMARA, 2002; LI et al., 2016; HUANG et al., 2016).

Sintomas semelhantes aos de intoxicação por metais pesados, como febre, cefaleia, fraqueza corporal e desmaios foram relatados por trabalhadores que atuaram na abertura do trecho sobre floresta da rodovia federal BR-307 (que liga a sede do município de São Gabriel da Cachoeira ao distrito de Cucuí, estado do Amazonas), obra esta realizada na década de 1970). Durante estudos para a determinação de valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do estado do Amazonas, verificou-se que uma amostra de solo coletada nas proximidades do trecho em questão apresentou concentração para o elemento cromo superior a $1,500 \text{ mg kg}^{-1}$.

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi investigar (1) o particionamento do cromo em diferentes frações do solo, (2) a biodisponibilidade de cromo em simulações de soluções gástrica e pulmonar em frações de diferentes tamanho do solo e, (3) com os dados de biodisponibilidade, executar a avaliação de risco para uma possível ingestão do solo contendo elevado teor de cromo.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Coleta de solo e análises químicas e físicas

As amostras do solo foram coletadas em um trecho de floresta secundária (0°20'21,35"N; 66°38'8,92"O) próximo a uma área de extração de material utilizado na pavimentação e terraplanagem da BR-307, que liga a sede do município de São Gabriel da Cachoeira ao distrito de Cucuí, no estado do Amazonas.

Estas amostras foram coletadas durante o período de amostragem dos solos para o estabelecimento dos valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do estado do Amazonas. Assim, foram coletadas 5 subamostras em superfície (0 - 20 cm) e subsuperfície (80 - 100 cm) com uso de trado de aço inoxidável e, após a coleta, as subamostras foram homogeneizadas para formar uma amostra composta para cada profundidade e armazenadas em sacos de polietileno.

As análises químicas e físicas dos solos (capacidade de troca de cátions, matéria orgânica, pH H₂O, areia, silte e argila) foram realizadas de acordo com EMBRAPA (2011). Os teores de metais pesados (V, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Pb) nos solos foram determinados na fração terra fina seca ao ar (TFSA), conforme o método EPA 3050B (USEPA, 1996a) (extração em bloco de digestão, utilizando ácido nítrico e peróxido de hidrogênio).

4.2.2 Extração sequencial de cromo

A extração sequencial de cromo foi realizada de acordo com o método proposto por Silveira et al. (2006) para solos de regiões tropicais. O método é dividido em procedimentos que permitem a identificação de cromo em 7 diferentes frações do solo: (F1) solúvel-trocável e (F2) adsorvido à superfície dos minerais, (F3) à matéria orgânica, (F4) aos óxidos de manganês, (F5) aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade, (F6) aos óxidos de ferro cristalinos e (F7) à fração residual.

Amostras de 1 g de solo foram pesadas e submetidas à extração sequencial com as seguintes soluções: (F1) 15 mL de CaCl₂ 0,1 M, (F2) 30 mL de NaOAc 1 M (pH 5,0), (F3) 5 mL de NaClO (pH 8,5), (F4) 30 mL de NH₂OH/HCl 0,05 M (pH 2,0), (F5) 30 mL de ácido oxálico 0,2 M + oxalato de amônio 0,2 M (pH 3,0), (F6) 40 mL de HCl 6 M e (F7) digestão em meio ácido (HNO₃ + HCl). Após cada extração, as amostras foram submetidas à centrifugação (2000 rpm) por 10 minutos. O cromo em solução foi

determinado por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP – MS).

4.2.3 Separação da frações de diferentes tamanho do solo

Para avaliar os teores de cromo nas frações de diferentes tamanhos dos solos, estes foram submetidos a processos mecânicos de peneiramento via seca e divididos, com base nos diâmetros (\emptyset) de cada peneira, nas seguintes frações: (1) < 2 mm; (2) $0,425 - 2$ mm; (3) $0,250 - 0,425$ mm; (4) $0,150 - 0,250$ mm; (5) $0,105 - 150$ mm e (6) $< 0,105$ mm.

Além disso, as frações com diâmetros (1) $< 0,105$ mm, (2) $0,053 - 0,105$ mm e (3) $< 0,053$ mm foram utilizadas em estudos de bioacessibilidade de cromo em solução simulando os fluidos pulmonares. Tais diâmetros foram escolhidos pelo fato de partículas desse tamanho serem facilmente suspensas como poeira, sendo também passíveis de inalação (COLOMBO et al., 2008; GUNEY et al., 2016).

4.2.4 Teores de cromo em digestão ácida

As diferentes frações do solo foram submetidas à digestão em meio ácido, com base no método EPA 3050B (USEPA, 1996a) (extração pseudo-total de metais). Para isso, as amostras foram pesadas (0,250 g) e transferidas para tubos de digestão de polipropileno. Em seguida, foram adicionados 10 mL de solução ácida (HNO_3 : H_2O) e os tubos foram colocados em um bloco de digestão sob a temperatura de aproximadamente 95 °C, até o volume reduzir para 5 mL. Após alcançar este volume, as amostras foram removidas do bloco de digestão e mantidas sob temperatura ambiente por cerca de 10 minutos, sendo então adicionados 2 mL de água ultrapura e 3 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30 %.

Após este procedimento, as amostras foram novamente levadas ao bloco digestor, a uma temperatura de aproximadamente 95 °C, até o volume reduzir para 5 mL. Após a redução do volume, as amostras foram removidas do bloco e os tubos foram completados com água ultrapura para um volume de 50 mL. O cromo no extrato da solução ácida foi determinado em espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GFAAS).

4.2.5 Teores de cromo hexavalente (Cr⁶⁺)

Os teores de Cr⁶⁺ nas diferentes frações do solo foram determinados em meio alcalino, conforme o método EPA 3060A (USEPA, 1996b). Amostras de 1 g destas frações foram pesadas e transferidas para tubos de centrífuga, sendo então adicionados 40 mL de uma solução alcalina (Na₂CO₃ 0,28 M + NaOH 0,5 M, com pH ajustado para 12). Em seguida, foram adicionados 400 mg de cloreto de magnésio (MgCl₂) em cada tubo, juntamente com 1 mL de solução *buffer* fosfatada 1 M (KH₂PO₄ 0,5 M + K₂HPO₄ 0,5 M), visando suprimir eventuais processos de oxidação de Cr³⁺ para Cr⁶⁺. Essa mistura foi mantida a uma temperatura entre 90 e 95 °C por um período de 1 hora, com agitações a cada 15 minutos.

Após o aquecimento, as amostras foram centrifugadas (10 minutos; 3000 rpm) e posteriormente filtradas. O cromo no extrato da solução alcalina foi determinado em espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GFAAS). Como controle de qualidade do método empregado, foram utilizadas amostras em brancos e *spikes* com Cr³⁺ e Cr⁶⁺.

4.2.6 Bioacessibilidade de cromo em solução gástrica e pulmonar

A bioacessibilidade do cromo foi obtida a partir de solução simulando os fluidos gástricos, usando o teste simplificado de extração de bioacessibilidade (*simplified bioaccessibility extraction test - SBET*) (RUBY et al., 1999; JUHASZ et al., 2007). Uma solução simulando o suco gástrico foi preparada a partir de glicina (solução 0,4 M; pH ajustado para 1,5 com ácido clorídrico concentrado). Amostras de 0,5 g de solo foram pesadas e transferidas para tubos de centrífuga, sendo então adicionados 50 mL de solução gástrica. Os tubos foram colocados em banho-maria (37 °C) e agitados em movimento horizontal (60 rpm) por um período de 1 hora. Em seguida, as amostras foram centrifugadas (4000 rpm), filtradas e os extratos armazenados para posterior leitura em espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GFAAS).

Uma solução simulando o líquido pulmonar (*Gamble's solution*) foi preparada de acordo com Midander et al. (2007), com as misturas dos reagentes seguindo uma ordem de adição, a fim de prevenir precipitações entre os diferentes sais (Tabela 1). Amostras de 0,5 g de solo foram pesadas, transferidas para tubos de centrífuga, sendo então adicionados 50 mL da solução de *Gamble*. A mistura foi colocada em banho-maria

e agitada em movimento horizontal (25 rpm), no escuro, por um período de 1 hora. Em seguida, as amostras foram centrifugadas (4000 rpm), filtradas e a leitura do cromo nos extratos foi realizada via espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GFAAS).

Tabela 1 – Reagentes químicos e ordem para mistura no preparo da solução para simulação de fluidos pulmonares.

Ordem de adição dos reagentes	Reagentes	Concentração (mg L ⁻¹)
1	Cloreto de magnésio – MgCl ₂	95
2	Cloreto de sódio – NaCl	6019
3	Cloreto de potássio – KCl	298
4	Fosfato de sódio dibásico - Na ₂ HPO ₄	126
5	Sulfato de sódio – Na ₂ SO ₄	63
6	Cloreto de cálcio dihidratado - CaCl ₂ . 2H ₂ O	368
7	Acetado de sódio - C ₂ H ₃ NaO ₂	574
8	Bicarbonato de sódio - NaHCO ₃	2604
9	Citrato de sódio tribásico dihidratado - C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ . 2H ₂ O	97

4.2.7 Avaliação de risco à saúde humana

Avaliações de risco são conduzidas principalmente para a saúde humana e têm como objetivo a identificação de efeitos potenciais adversos de substâncias tóxicas à saúde quando estas são expostas no ambiente (CACHADA, 2016). A avaliação de risco à saúde humana (*human health risk assessment – HHRA*) de uma determinada substância (orgânica e/ou inorgânica) é determinada e caracterizada a partir da exposição (contato) desta no ambiente, seja por ingestão oral, inalada ou por contato dermal. A partir dessa exposição, são calculados índices como ingestão diária média (IDM), quociente de risco à exposição desta substância (QR) e o risco de câncer (RC).

Assim, os índices IDM, QR e RC foram calculados para avaliar um cenário potencial de risco para adultos e crianças expostos às elevadas concentrações de cromo verificadas no presente estudo. A IDM foi calculada com base na concentração pseudo-total de cromo, na concentração bioacessível de cromo (solução gástrica) e nas concentrações de cromo hexavalente. Os parâmetros IDM, QR e RC foram calculados com base em variáveis para adultos e crianças (Tabela 2), conforme as equações 1, 2 e 3, de acordo com a Agência Americana de Proteção Ambiental dos Estados Unidos –

USEPA (USEPA, 2001). Por fim, a avaliação de risco foi conduzida de acordo com os resultados obtidos.

$$IDM = \frac{C \times TI \times FE \times DE}{PC \times TM} \quad (1)$$

$$QR = \frac{DRO}{IDM} \quad (2)$$

$$RC = IDM \times FIC \quad (3)$$

Tabela 2 – Variáveis utilizadas para a avaliação de risco à saúde humana (USEPA, 2001).

Variáveis	Valores	
	Adultos	Crianças
Ingestão diária média - IDM (mg kg ⁻¹ dia ⁻¹)	-	-
Concentração - C (mg kg ⁻¹)	-	-
Taxa de ingestão diária - TI (mg dia ⁻¹)	100	200
Frequência de exposição - FE (dia ano ⁻¹)	279	279
Duração de exposição - DE (anos)	24	4
Peso corporal - PC (kg)	70	16
Tempo médio de exposição – TM:		
TM = Efeitos não carcinogênicos (DE x 365 dias)	1460	1460
TM = Efeitos carcinogênicos (70 anos x 365 dias)	25550	25550
Quociente de risco – QR	-	-
Risco de câncer - RC (mg kg ⁻¹ dia ⁻¹)	-	-
Fator de inclinação para câncer - FIC (mg kg ⁻¹ dia ⁻¹)	0,5	0,5
Dose de referência oral - DRO (mg kg ⁻¹ dia ⁻¹)	0,003	0,003

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Atributos do solo

As propriedades do solo analisado e as concentrações de metais pesados, para as profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, podem ser observadas na tabela 3. Os baixos valores de capacidade de troca de cátions, matéria orgânica do solo e pH refletem bem os solos da região Amazônica, que são pobres em nutrientes, geralmente ácidos e com baixos teores de matéria orgânica (QUESADA, 2010). As condições predominantes na região Amazônica são favoráveis a uma maior remoção de elementos relacionados à fertilidade

do solo, à maior decomposição de matéria orgânica e, conseqüentemente, a uma maior lixiviação de nutrientes.

De maneira geral, os teores de metais pesados obtidos nas duas profundidades são maiores que os valores de referência de qualidade estabelecidos para metais pesados em solos do estado do Amazonas (ver capítulo 2). Na área de estudo, os solos são desenvolvidos sobre crostas lateríticas ferruginosas. Tais crostas são produtos do intemperismo de rochas do tipo Augen gnaisse monzograníticas do complexo Cauabari (litofácies Tarsira) e apresentam algum tipo de influência das rochas carbonáticas da região conhecida como Morro dos Seis Lagos. Elas são estão intensamente intemperizadas, formando crostas lateríticas ricas em metais pesados e outros elementos químicos como os terras raras, nióbio, vanádio e zircônio (RADAM BRASIL, 1976; REIS et al., 2006).

Tabela 3 – Atributos químicos e físicos dos solos estudados.

Atributos	Profundidades	
	(0 - 20 cm)	(80 - 100 cm)
CTC (cmol _c dm ⁻³)	0,57	0,17
MO (%)	3,68	2,53
Areia (%)	50	50
Silte (%)	8	10
Argila (%)	42	40
pH	4,45	4,84
V (mg kg ⁻¹)	104,58	101,79
Mn (mg kg ⁻¹)	206,89	192,87
Cr (mg kg ⁻¹)	2346	1864
Co (mg kg ⁻¹)	3,67	3,41
Ni (mg kg ⁻¹)	62,76	63,52
Cu (mg kg ⁻¹)	6,55	6,14
Zn (mg kg ⁻¹)	14,69	16,39
As (mg kg ⁻¹)	<LD	0,01
Se (mg kg ⁻¹)	0,56	0,41
Cd (mg kg ⁻¹)	0,02	0,02
Pb(mg kg ⁻¹)	3,03	2,98

CTC- Capacidade de troca catiônica; MO - Matéria orgânica do solo; <LD – Menor que o limite de detecção.

4.3.2 Extração sequencial de cromo

Os resultados da extração sequencial de cromo nas duas profundidades são apresentados na figura 1. As frações consideradas móveis (F1 e F2) apresentaram valores

menores que $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ em ambas profundidades, demonstrando pouca contribuição no teor total de cromo ($\Sigma \text{ F1} \rightarrow \text{F7}$). Segundo Shaheen e Rinklebe (2014), teores elevados de metais nas frações F1 e F2 podem evidenciar grande biodisponibilidade dos mesmos e também uma grande contribuição antropogênica. Neste estudo, os teores inferiores a $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ obtidos indicam que os solos não foram afetados por atividades antropogênicas. Segundo Sierra et al. (2007), metais pesados de origem geogênica apresentam sua biodisponibilidade geralmente inferior quando comparada à de elementos que são provenientes de fontes antrópicas.

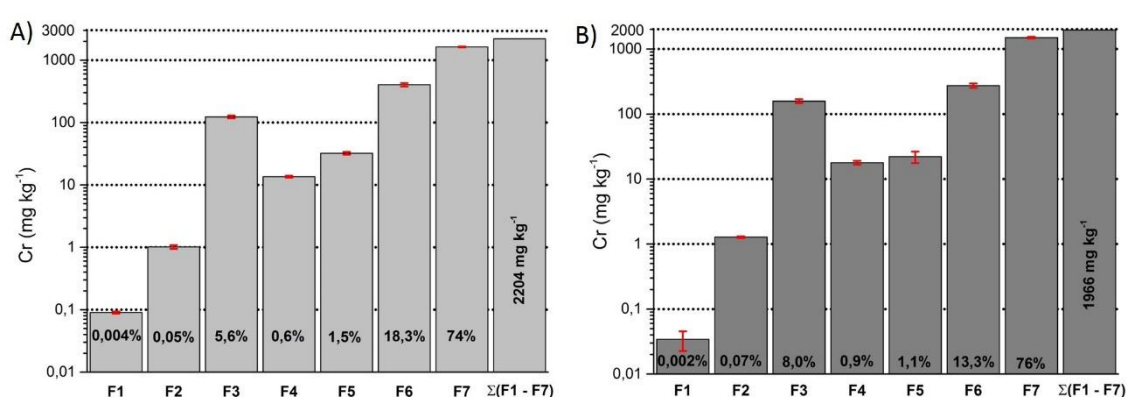


Figura 1 – Distribuição de cromo nas diferentes frações do solo após extração sequencial nas profundidades de 0 – 20 (A) e 80 – 100 cm (B). Os números dentro das barras representam a porcentagem de Cr em cada fração em relação ao teor de cromo total ($\Sigma \text{ F1} \rightarrow \text{F7}$).

A fase potencialmente móvel de cromo no solo é representada pelas frações F3, F4 e F5. O somatório das concentrações de Cr nas frações F4 e F5 apresentou valores de 46 e 40 mg kg^{-1} nas profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente, representando assim 2,1 e 2 % do valor total de cromo em cada profundidade. Apesar dessa porcentagem de contribuição no teor total ser baixa, é importante observar que os teores obtidos em cada fração evidenciam o Cr em fases potencialmente móveis no solo e, portanto, podem representar riscos potenciais para plantas, animais e à saúde humana devido à sua absorção por partes dos vegetais, podendo posteriormente ser incorporado à cadeia alimentar (AGNIESKA, BARBARA, 2012).

Além disso, os teores de Cr associados à fração dos óxidos de manganês (F4) podem ocasionar situações de risco ambiental, uma vez que os óxidos de Mn têm potencial para oxidar Cr^{3+} em Cr^{6+} , sendo esta última forma relacionada a severas doenças em seres humanos (FENDORF, 1995; FELTER, DOURSON, 1997; COSTA, 1997).

Nas duas profundidades, os maiores teores de Cr foram obtidos nas frações ligadas à matéria orgânica (F3), aos óxidos de Fe cristalinos (F6) e principalmente à fração residual (F7). Apesar do Cr associado às frações F6 e F7 ser extraído a partir de óxidos de ferro cristalinos e da fração residual, respectivamente, formas estas bem resistentes ao intemperismo e estáveis no ambiente, o referido metal apresenta, nesse caso, grande potencial de mobilidade no solo (MA, RAO, 1997). Os óxidos de ferro, quando inseridos em ambientes alagados ou redutores, podem liberar o Cr aprisionado em sua estrutura cristalina.

4.3.3 Teores de Cr e Cr⁶⁺ em frações de diferentes tamanhos do solo

Os resultados dos teores totais de Cr nas diferentes frações do solo, nas profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, são apresentados na figura 2. Observou-se que as concentrações médias de Cr para as diferentes frações, tanto em superfície quanto em subsuperfície de aproximadamente 2020 mg kg⁻¹. Além disso, para as duas camadas, não foi observado incremento significativo nos teores de Cr com a diminuição do tamanho das frações. Os teores de cromo obtidos foram superiores aos valores de referência de qualidade estabelecidos para este elemento em solos do estado do Amazonas (30,52 mg kg⁻¹ com base no percentil P90) e também foram superiores ao valor para investigação industrial (400 mg kg⁻¹), preconizado pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA (CONAMA, 2009).

Na profundidade de 0 – 20 cm, as frações com partículas de diâmetro entre 0,425 e 2 mm destacaram-se das demais, apresentando os maiores teores de Cr (2700 mg kg⁻¹), enquanto que, para os demais tamanhos, não foram verificadas diferenças significativas. Já na profundidade de 80 – 100 cm, os teores mais elevados de Cr foram obtidos nas frações com partículas de menor diâmetro (média de 2270 mg kg⁻¹).

Segundo Qian et al. (1996), a acumulação de metais pesados em frações finas dos solos é atribuída à maior área superficial específica dos minerais da fração argila. No presente estudo, a não diferenciação entre as diferentes frações do solo em relação aos teores de Cr pode estar associada à maior estabilidade de microagregados (compostos de partículas mais finas), que não foram totalmente separados durante o processo de peneiramento. Além disso, essa fração mais grosseira do solo pode também estar sendo constituída de concreções ferruginosas formadas durante o processo de gênese das crostas lateríticas e que apresentam grande capacidade de retenção de metais pesados.

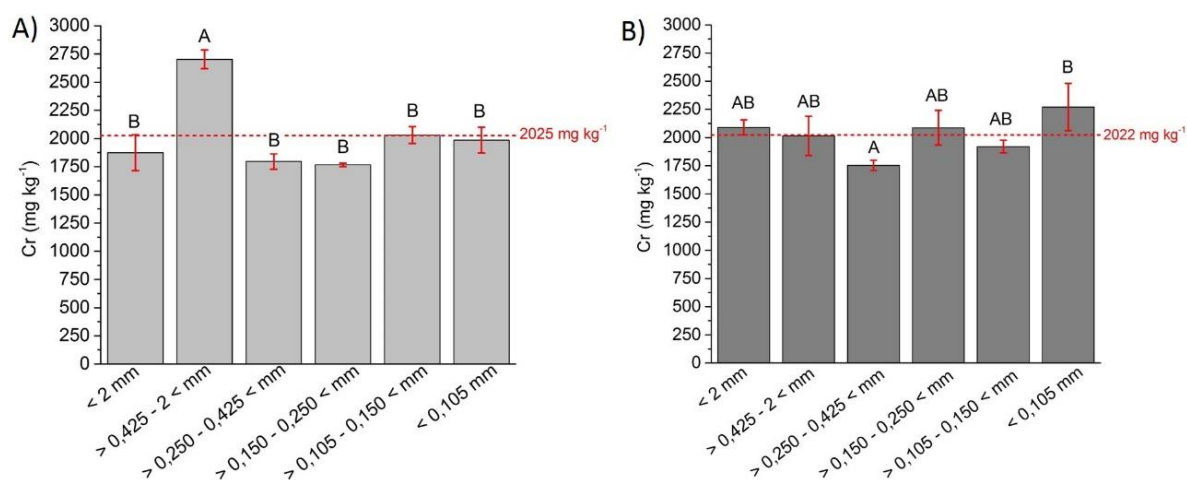


Figura 2 – Teores de cromo nas frações de diferentes tamanhos do solo nas profundidades de 0 – 20 (A) e 80 – 100 cm (B). A linha vermelha tracejada representa o valor médio da concentração de Cr entre todas as frações. Médias com letras iguais não se diferenciam entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Tukey.

Apesar da similaridade entre os teores de Cr nas diferentes frações do solo analisado no presente estudo, o conhecimento sobre a distribuição de metais pesados nos diferentes tamanho das frações é uma premissa em estudos sobre avaliações de risco e de processos de remediação de solos contaminados com metais (GONG et al., 2014). De forma geral, partículas que estão nas frações mais finas têm maior capacidade para adsorver e transportar metais pesados (tendo em vista a sua maior área superficial específica), sendo facilmente transportadas para a superfície de corpos de água ou dispersas como poeira, apresentando, portanto, riscos potenciais para o ambiente (GONG et al., 2014; COSTA et al., 2009).

Os resultados dos teores de cromo hexavalente (Cr⁶⁺) nas diferentes frações do solo, para as camadas de 0 – 20 e 80 – 100 cm, são apresentados na figura 3. Os teores médios de Cr⁶⁺ para as diferentes frações foram de 716 e 2050 µg kg⁻¹, em superfície e subsuperfície, respectivamente. Os teores médios mais baixos obtidos em superfície podem estar relacionados à atividade da biota do solo, que favorece um maior contato entre as partículas de solo e a matéria orgânica, que é um agente redutor de Cr⁶⁺ para Cr³⁺ (FENDORFF, 1995; RAJAPAKSHA et al., 2013).

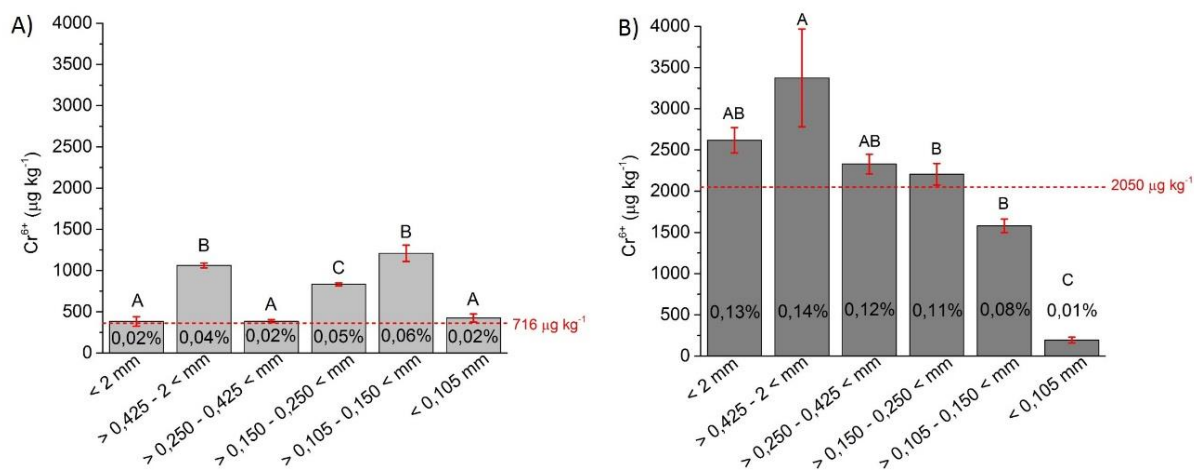


Figura 3 – Teores de cromo hexavalente (Cr^{6+}) nas frações de diferentes tamanhos do solo nas profundidades de 0 – 20 (A) e 80 – 100 cm (B). Os números dentro das barras representam a porcentagem de Cr^{6+} em relação ao teor total desse elemento extraído com $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$. A linha vermelha tracejada representa o valor médio da concentração de Cr^{6+} entre todos os tamanhos de partículas. Médias com letras iguais não se diferenciam entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Tukey.

A distribuição dos teores de Cr^{6+} nas frações de diferentes tamanhos do solo parece não seguir uma tendência em superfície. Já em profundidade, os teores mais elevados de Cr^{6+} foram observados nas frações de maior diâmetro (0,425 – 2 mm). Apesar disso, as concentrações de Cr^{6+} obtidas nas frações com partículas de menores diâmetros (0,105 – 0,150 mm), por exemplo, foram de 1200 e 1500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ em superfície e subsuperfície, respectivamente. Tais partículas apresentam potencial de mobilidade para a superfície de corpos de água ou dispersão com poeira, podendo ser facilmente ingeridas ou inaladas.

Os teores de Cr^{6+} obtidos no presente estudo foram inferiores ao teor médio relatado por Broadway et al. (2010) ($6,4 \pm 5,1 \text{ mg kg}^{-1}$) para 27 solos contaminados com resíduo do processamento de cromita em Glasgow (Escócia) e também inferiores ao teor médio encontrado por Garnier et al. (2009) (446 mg kg^{-1}), em dois solos formados sobre rochas ultramáficas no município de Niquelândia, Goiás.

Embora os teores médios de Cr^{6+} aqui obtidos sejam inferiores aos de áreas contaminadas e de ambientes com rochas ricas em cromo, estes podem ser susceptíveis à lixiviação. A mobilidade de Cr^{6+} foi avaliada por Moraetis et al. (2012), que observaram que 13 % de Cr^{6+} ($20 \mu\text{g L}^{-1}$) apresentaram potencial de lixiviação em solos na Grécia, enquanto Becquer et al. (2003) demonstraram que o Cr^{6+} foi adsorvido em menores concentrações em solos que receberam adubação fosfatada, indicando uma maior mobilidade deste elemento no solo com possíveis consequências ambientais.

4.3.4 Bioacessibilidade de cromo *in vitro*

Os resultados dos ensaios de bioacessibilidade para cromo nas frações de diferentes tamanhos do solo, simulando as soluções dos fluidos gástrico e pulmonar, são apresentados nas figuras 4 e 5. Observou-se que os teores médios (bioacessíveis) de cromo na solução gástrica são semelhantes nas duas camadas analisadas, com médias de 22 e 21 mg kg^{-1} para 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente. Esses resultados encontrados no presente estudo foram superiores aos obtidos por Cox et al. (2013) em solos formados sobre basalto (média de 4,55 mg kg^{-1}) e por Nico et al. (2006) em madeira contaminada com solução de cromo, cobre e arsênio (CCA) usada na preservação de madeiras (média de 3,28 mg kg^{-1}).

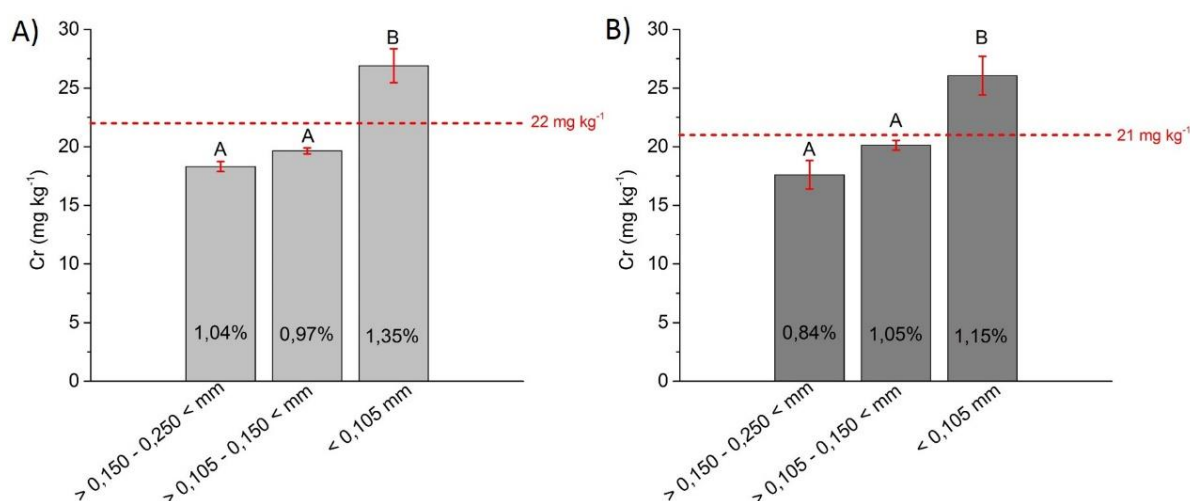


Figura 4 – Teores bioacessíveis de cromo nas frações de diferentes tamanhos do solo, após simulação de solução gástrica, nas profundidades de 0 – 20 (A) e 80 – 100 cm (B). Os números dentro das barras representam a porcentagem dos teores bioacessíveis de Cr em relação ao teor total desse elemento extraído com $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$. A linha vermelha tracejada representa o valor médio da concentração bioacessível de Cr entre todas as frações de diferentes tamanhos. Médias com letras iguais não se diferenciam entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Tukey.

Observou-se que, para as duas camadas, os teores bioacessíveis de Cr obtidos nas frações de menores diâmetros (< 0,105 mm) foram estatisticamente diferentes dos teores observados nas frações de maior tamanho, sendo os maiores teores desse elemento obtidos na fração mais fina do solo. Os resultados encontrados no presente estudo foram semelhantes aos de Madrid et al. (2008) em estudos de bioacessibilidade de Cr em solos

urbanos da Espanha e Itália. Sobre isso, sabe-se que as frações finas do solo apresentam maiores riscos à saúde, tendo em vista sua maior capacidade de retenção de poluentes (metais pesados e compostos orgânicos), maior mobilidade no ambiente, estando muitas vezes presentes na atmosfera como poeira (LUO et al., 2011; MADRID et al., 2008).

Os resultados dos teores bioacessíveis de Cr em solução simulando o fluido pulmonar (Figura 5) mostraram que as partículas com os menores diâmetros (< 0,053 mm) apresentaram os maiores teores de Cr, sendo estatisticamente diferentes das demais frações tamanhos de partículas em ambas as profundidades avaliadas. Segundo Colombo et al. (2008), a deposição de partículas no trato respiratório é afetada principalmente pelo tamanho das partículas, sendo as partículas de menor diâmetro (< 0,004 mm) facilmente capazes de penetrar profundamente na região alveolar do sistema respiratório. Já as partículas com diâmetros entre 0,01 e 0,1 mm são também inaladas, sendo depositadas na parte superior do sistema respiratório.

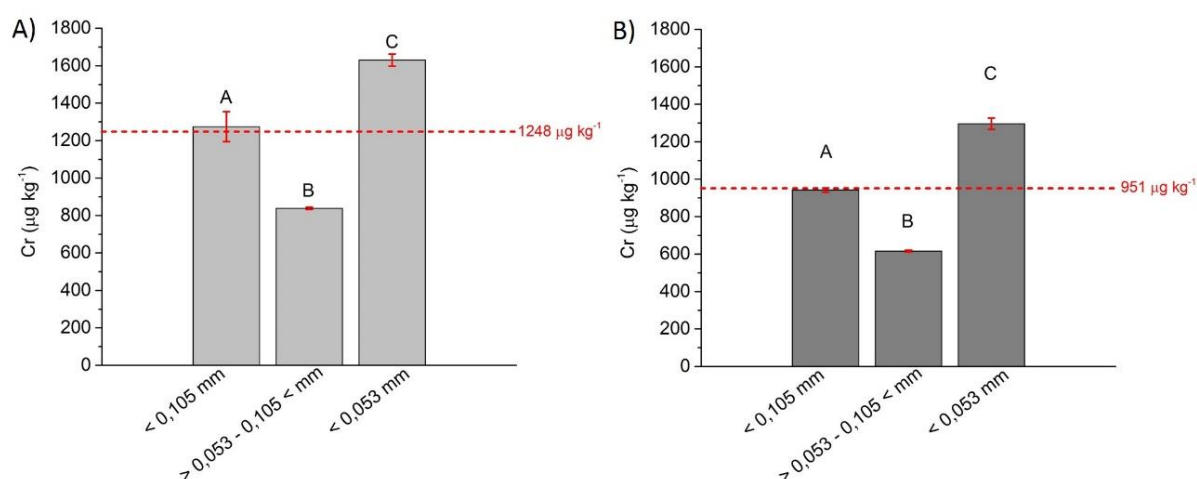


Figura 5 – Teores bioacessíveis de cromo nas frações de diferentes tamanhos solo, após simulação de solução do fluido pulmonar, nas profundidades de 0 – 20 (A) e 80 – 100 cm (B). A linha vermelha tracejada representa o valor médio da concentração bioacessível de Cr entre todas as frações. Médias com letras iguais não se diferenciam entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Tukey.

4.3.5 Avaliação de risco

Os resultados da Ingestão Diária Média (IDM) de cromo para uma exposição nas duas profundidades analisadas são apresentados na figura 6. A IDM foi calculada com base nas concentrações pseudo-totais de Cr (2025 e 2022 mg kg⁻¹ em 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente), bioacessíveis de Cr (solução gástrica) (27 e 26 mg kg⁻¹ em 0 -20 e

80 – 100 cm, respectivamente) e de Cr^{6+} (1,2 e 3,37 mg kg^{-1} em 0 – 20 e 80 – 100 cm, respectivamente). Ainda em relação à IDM de Cr, foram simulados dois cenários, um de situação cancerígena e outro de não cancerígena, lembrando que um dos fatores que pode promover o surgimento de câncer é o tempo de exposição a uma determinada substância tóxica.

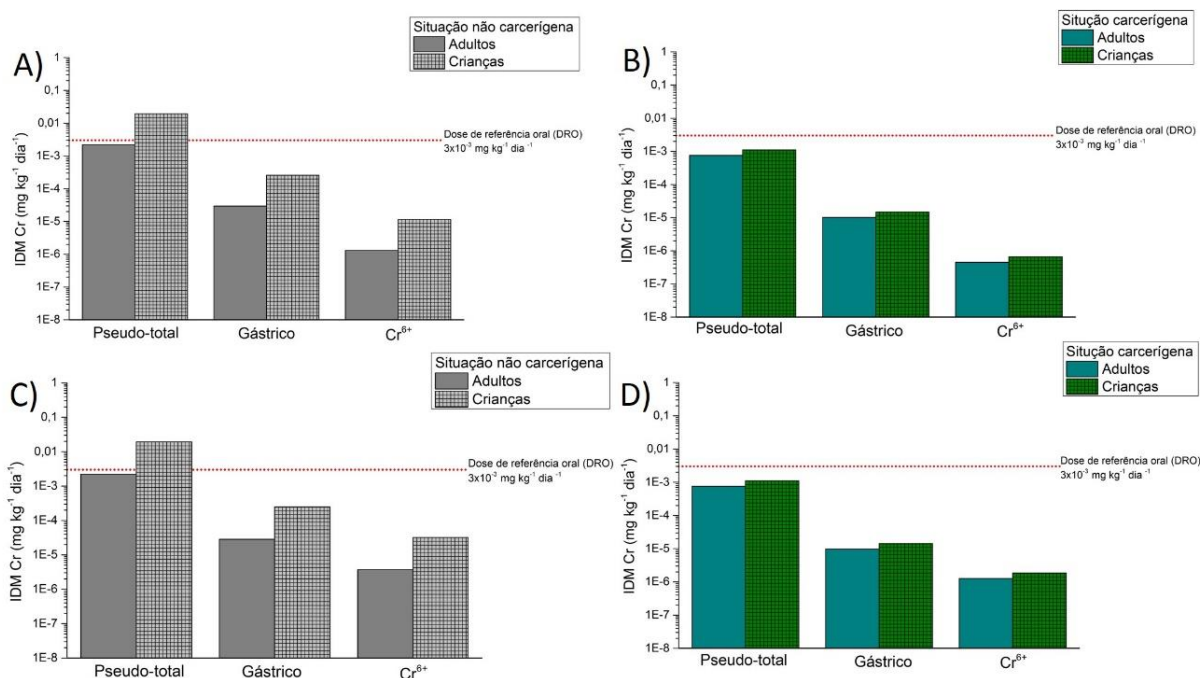


Figura 6 – Valores de Ingestão Diária Média (IDM) de cromo para uma exposição a diferentes concentrações totais e bioacessíveis (fluido gástrico) de Cr e de Cr^{6+} nas profundidades de 0 – 20 (A, B) e (B) e 80 – 100 cm (C, D) para situações cancerígenas e não cancerígenas. A linha horizontal vermelha indica a dose de referência oral diária para Cr^{6+} .

Os resultados mostraram que a IDM com base no teor total de Cr foi maior que nas situações com base nos teores bioacessíveis de Cr e de Cr^{6+} . Esta diferença está relacionada com os menores teores de cromo obtidos na fração bioacessível e sob a forma de Cr^{6+} . Resultados de uma maior IDM com base nos teores totais de metais também foram encontrados por Gress et al. (2014) e Li et al. (2015), em estudos sobre o elemento Arsênio (As), e por Hamad et al. (2014), em um estudo com elementos potencialmente tóxicos. É oportuno ressaltar que os teores totais de Cr são, em sua maioria, formados por Cr^{3+} e, até o momento, esta forma não foi considerada danosa à saúde humana em baixas doses.

Comparando-se os valores de IDM de adultos e crianças, observou-se que somente a IDM para crianças com base nos teores totais de Cr foi maior que a dose de referência oral (DRO) diária (para uma situação não cancerígena). Segundo Barnes e

Dourson (1988), a dose de referência é uma estimativa à exposição de populações humanas a determinadas substâncias tóxicas sem apreciáveis riscos deletérios à sua saúde durante um tempo de vida.

A partir dos dados de IDM, foi possível calcular para as situações não carcinogênica e carcinogênica o quociente de risco (QR) (Tabela 4), parâmetro calculado pela relação entre a dose de referência oral (DRO) e a IDM. O quociente de risco demonstra o nível de segurança para uma possível ingestão de substâncias danosas à saúde não suficiente para causar câncer. Observou-se que somente o QR para crianças baseado nos teores de cromo total foi maior que o nível de segurança (= 1). Segundo Hu et al. (2012), mesmo em cenários para situações não carcinogênicas, um valor de $QR > 1$ talvez possa resultar em potenciais riscos à saúde de crianças.

Já o risco de câncer (RC) é a probabilidade de um indivíduo desenvolver qualquer tipo de câncer a partir de um tempo de exposição a uma substância carcinogênica. Valores menores que 1×10^{-6} (ou a probabilidade de 1 em 1.000.000 de indivíduos desenvolverem câncer durante um tempo de vida) podem ser considerados sem importância, enquanto que valores de RC maiores que 1×10^{-4} são considerados inaceitáveis (LUO et al., 2012; USEPA, 2001).

No presente estudo, observou-se que somente existe a chance de risco de câncer (RC) quando os cálculos são realizados com base nos teores totais e bioacessíveis de cromo (Tabela 4), sendo os valores de RC maiores que os aceitáveis para adultos e crianças. Este $RC > 1 \times 10^{-4}$ talvez implique em desenvolvimento de câncer durante o tempo de vida de adultos e crianças expostos aos teores de cromo obtidos no presente estudo.

Tabela 4 – Valores de avaliação de risco à saúde humana para duas amostras de solo nas profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm, para crianças e adultos com base nos teores totais e bioacessíveis de Cr (fluido gástrico), e Cr^{6+} .

Prof. (cm)		Total		Fluido gástrico		Cr^{6+}	
		Adultos	Crianças	Adultos	Crianças	Adultos	Crianças
0 – 20	QR	7,37E-01	6,45E+00	9,83E-03	8,60E-02	4,37E-04	3,82E-03
80 – 100		7,36E-01	6,44E+00	9,46E-03	8,28E-02	1,23E-03	1,07E-02
0 – 20	RC	1,52E-03	2,21E-03	2,02E-05	2,95E-05	8,99E-07	1,31E-06
80 – 100		1,52E-03	2,21E-03	1,95E-05	2,84E-05	2,52E-06	3,68E-06

Prof. – Profundidade. Quociente de risco (QR) e risco de câncer (RC) foram calculados com base na ingestão diária média (IDM) para as concentrações de cromo a partir dos teores totais e bioacessíveis (fluido gástrico), e de Cr^{6+} .

4.4 CONCLUSÕES

Os maiores teores de cromo, obtidos pela extração sequencial, são encontrados principalmente nas frações ligadas aos óxidos de ferro e a fração residual do solo, e se não ocorrerem mudanças no ambiente no qual este solo é encontrado, o seu conteúdo será de difícil lixiviação para as áreas rebaixadas da paisagem, não atingindo assim, as populações que vivem nas áreas de várzea do estado do Amazonas.

Os teores de Cr nas frações de diferentes tamanhos solo obtidos por digestão ácida foram bem próximos, não sendo observado incremento significativo nos teores desse metal com a diminuição da fração do solo. Entretanto, as partículas menores dos solos apresentaram concentrações de Cr^{6+} que podem representar riscos à saúde humana, tendo em vista a sua facilidade de dispersão no ambiente. Além disso, os teores bioacessíveis de cromo em solução gástrica foram elevados, podendo conferir riscos à saúde uma vez que ocorra a ingestão de grandes quantidades de solo ao longo do tempo.

A avaliação de risco indicou que uma exposição diária de Cr de 2020 mg kg^{-1} resulta em uma ingestão diária média maior que a dose de referência oral diária do metal, sendo suficiente para ser considerada como de risco à saúde humana e, além disso, essa ingestão ao longo de um tempo de vida pode resultar em prováveis riscos de câncer.

REFERÊNCIAS

- AGNIESZKA, J., BARBARA, G. Chromium, nickel and vanadium mobility in soils derived from fluvioglacial sands. **Journal Hazardous Material**, v. 237 - 238, p. 315 – 322, 2012.
- APTE, A.D., TARE, V., BOSE, P., 2006. Extent of oxidation of Cr (III) to Cr (VI) under various conditions pertaining to natural environment. **Journal Hazardous Material**, v. 128, p. 164–174, 2006.
- BARNES, D. G., DOURSON, M. Reference dose (RfD): description and use in health risk assessments. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 8, p. 471–86, 1988.
- BECQUER, T., QUANTN, C., SICOT, M., BOUDOT, J. P. Chromium availability in ultramafic soils from New Caledonia. **Science of Total Environment**, v. 301, p. 251 – 261, 2003.
- BROADWAY, A., CAVE, M.R., WRAGG, J., FORDYCE, F.M., BEWLEY, R.J.F., GRAHAM, M.C., NGWENYA, B. T., FARMER, J. G. Determination of the bioaccessibility of chromium in Glasgow soil and the implications for human health risk assessment. **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 267–77, 2010.
- CACHADA, A., SILVA, E. F. D., DUARTE, A. C., PEREIRA, R. Risk assessment of urban soils contamination: The particular case of polycyclic aromatic hydrocarbons. **Science of the Total Environment**, v. 551 - 552, p. 271 – 284, 2016.
- CEFALU, W.T., HU, F.B. Role of chromium in human health and in diabetes. **Diabetes Care**, v. 27, p. 2741 – 2751, 2004
- COLOMBO, C., MONHEMIUS, A.J., PLANT, J.A. Platinum, palladium and rhodium release from vehicle exhaust catalysts and road dust exposed to simulated lung fluids. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 71, p. 722 – 730, 2008.
- COSTA, M., 1997. Toxicity and carcinogenicity of Cr (VI) in animal models and humans. **Critical Reviews in Toxicology**, v. 27, p. 431–442, 1997.
- COX, S.F., CHELLIAH, M., MCKINLEY, J.M., PALMER, S., OFTERDINGER, U., CAVE, M.R., WRAGG, J., YOUNG, M. The importance of solid-phase distribution on the oral bioaccessibility of Ni and Cr in soils overlying Palaeogene basalt lavas, Northern Ireland. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 35, p. 553 – 567, 2013.
- CONAMA - **CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE**, 2009. Resolução nº 420/2009. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf> Acesso em: 16 Maio de 2016.
- EASTMOND, D.A., MACGREGOR, J.T., SLESINSKI, R.S. Trivalent chromium: assessing the genotoxic risk of an essential trace element and widely used human and animal nutritional supplement. **Critical Reviews in Toxicology**, v. 38, p. 173 – 190, 2008.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2° ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, Rio de Janeiro. 2011. 230 p.

FELTER, S. P., DOURSON, M. L. Hexavalent chromium-contaminated soils: options for risk assessment and risk management. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 25, p. 43–59, 1997.

FENDORF, S.E. Surface reactions of chromium in soils and waters. **Geoderma**, v. 67, p. 55 – 71, 1995.

FENDORF, S.E., ZASOSKI, R.J. Chromium (III) oxidation by delta manganese oxide (MnO₂). 1. Characterization. **Environmental Science & Technology**, v. 26, p. 79 – 85, 1992.

GARNIER, J., QUANTIN, C., ECHEVARRIA, G., BECQUER, T. **Assessing chromate availability in tropical ultramafic soils using isotopic exchange kinetics**. *Journal of Soils and Sediments*, v. 9, p. 468 – 475, 2009.

GONNELLI, C., RENELLA, G., Chromium and Nickel. In: ALLOWAY, B. J., TREVORS J. T., **Heavy Metals in Soils-Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability**. New York: Springer Dordrecht Heidelberg. Third edition, pp 313- 334, 2012.

GONG, C., MA, L., CHENG, H., LIU, Y., XU, D., LI, B., LIU, F., REN, Y., LIU, Z., ZHAO, C., YANG, K., NIE, H., LANG, C. Characterization of the particle size fraction associated heavy metals in tropical arable soils from Hainan Island, China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 139, p. 109–114, 2014.

GRESS, J. K., LESSL, J. T., DONG, X., MA, L. Q. Assessment of children's exposure to arsenic from CCA-wood staircases at apartment complexes in Florida. **Science of the Total Environment**, v. 476–477, p. 440–446, 2014.

GUNEY, M., CHAPUIS, R. P., ZAGURY, G. J. Lung bioaccessibility of contaminants in particulate matter of geological origin. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1 – 13, 2016.

HAMAD, S. H., SCHAUER, J.J., SHAFER, M.M., AL-RHEEM, E.A., SKAAR, P.S., HEO, J., TEJEDOR-TEJEDOR, I. Risk assessment of total and bioavailable potentially toxic elements (PTEs) in urban soils of Baghdad–Iraq. **Science of the Total Environment**, v. 494 –495, p. 39 – 48, 2014.

HU, X., ZHANG, Y., DING, Z., WANG, T., LIAN, H., SUN, Y., WU, J. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China. **Atmospheric Environment**, v. 57, p. 146–152, 2012.

HUANG, X., BETHA, R., TAN, L. Y., BALASUBRAMANIAN, R. Risk assessment of bioaccessible trace elements in smoke haze aerosols versus urban aerosols using simulated lung fluids. **Atmospheric Environment**, v. 25, p. 505 – 511, 2016.

- JUHASZ, A. L., SMITH, E., WEBER, J., REES, M., ROFE, A., KUCHEL, T., SANSOM, L., NAIDU, R. Comparison of in vivo and in vitro methodologies for the assessment of arsenic bioavailability in contaminated soils. **Chemosphere**, v. 69, p. 961 – 966, 2007.
- KOZUH, N., TUPAR, J., GORENC, B. Reduction and oxidation processes of chromium in soils. **Environmental Science & Technology**, v. 34, p. 112–119, 2000.
- LI, H. B., LI, J., ZHU, Y. G., JUHASZ, A. J., MA, L. Q. Comparison of arsenic bioaccessibility in housedust and contaminated soils based on four in vitro assays. **Science of the Total Environment**, v. 532, p. 803 – 811, 2015.
- LI, S. W., LI, H. B., LUO, J., LI, H. M., QIAN, X., LIU, M. M., BI, J., CUI, X. Y., MA, L. Q. Influence of pollution control on lead inhalation bioaccessibility in PM_{2.5}: A case study of 2014 youth olympic games in Nanjing. **Environment International**, v. 94, p. 69 – 75, 2016.
- LUO, X. S., YU, S., LI, X. D. Distribution, availability, and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: implications for assessing the risk to human health. **Environment Pollution**, v. 159, p. 1317–1326, 2011.
- LUO, X. S., DING, J., XU, B., WANG, Y.J., LI, H. B., YU, S. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils. **Science of the Total Environment**, v. 424, p. 88–96, 2012.
- MA, L.Q., RAO, G.N. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 26, p. 259–264, 1997.
- MA, Y., HOODA, P. S., Chromium, Nickel and Cobalt. In: HOODA, P. S., **Trace elements in soils**. Wiley. 461 – 480, 2010.
- MA, H., HUNG, M. L., PI-CHENG, C. A systemic health risk assessment for the chromium cycle in Taiwan. **Environment International**, v. 33, p. 206 – 218, 2007.
- MADRID, F., BIASIOLI, M., AJMONE-MARSAN, F. Availability and bioaccessibility of metals in fine particles of some urban soils. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 55, p. 21 – 32, 2008.
- MIDANDER, K., WALLINDER, I.O., LEYGRAF, C. In vitro studies of copper release from powder particles in synthetic biological fluids. **Environment Pollution**, v. 145, p. 51–59, 2007.
- MORAETIS, D., NIKOLAIDIS, N., KARATZAS, G., DOKOU, Z., KALOGERAKIS, N., WINKEL, L., PALAIOGIANNI-BELLOU, A. Origin and mobility of hexavalent chromium in North-Eastern Attica, Greece. **Applied Geochemistry**, v. 27, p. 1170–1178, 2012.

NICO, P.S., RUBY, M.V., LOWNEY, Y.W., HOLM, S.E. Chemical speciation and bioaccessibility of arsenic and chromium in chromated copper arsenate-treated wood and soils. **Environmental Science & Technology**, v. 40, p. 402–408, 2006.

OZE, C., FENDORF, S., BIRD, D.K., COLEMAN, R.G., Chromium geochemistry of serpentine soils. **International geology review**, v. 46, p. 97–126, 2004.

QUESADA, C.A., LLOYD, J., SCHWARZ, M., PATIÑO, S., BAKER, T.R., CZIMCZIK, C., FYLLAS, N.M., MARTINELLI, L., NARDOTO, G.B., SCHMERLER, J., SANTOS, A.J.B., HODNETT, M.G., HERRERA, R., LUIZÃO, F.J., ARNETH, A., LLOYD, G., DEZZEO, N., HILKE, I., KUHLMANN, I., RAESSLER, M., BRAND, W.A., GEILMANN, H., MORAES FILHO, J.O., CARVALHO, F.P., ARAUJO FILHO, R.N., CHAVES, J.E., CRUZ JUNIOR, O.F., PIMENTEL, T.P., PAIVA, R. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1515–1541, 2010.

QIAN, J., SHAN, X.Q., WANG, Z.J., TU, Q. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil. **Science of the Total Environment**, v. 187, p. 131–141, 1996.

RAJAPAKSHA, A.U., VITHANAGE, M., OK, Y.S., OZE, C. Cr (VI) formation related to Cr(III) - muscovite and birnessite interactions in ultramafic environments. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 17, p. 9722–9729, 2013.

RADAM BRASIL. **Folha NA 19 - Pico da Neblina**. Rio de Janeiro, DNPM, 1976. 144p. (Levantamento de Recursos Naturais, 11).

REIS, N. J., ALMEIDA, M. E., RIKER, S. L., FERREIRA, A. L. **Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas**. Programa Geologia do Brasil. CPRM, 2006.

RUBY, M. V., DAVIS, A., SCHOOF, R., EBERLE, S., SELLSTONE, C. M. Estimation of lead and arsenic using a physiological based extraction test. **Environmental Science & Technology**, v. 30, p. 442 - 430, 1996.

RUBY, M. V., SCHOOF, R., BRATTIN, W., GOLDADE, M., POST, G., HARNOIS, M., MOSBY, D. E., CASTEEL, S. W., BERTI, W., CARPENTER, M., EDWARDS, D., CRAGIN, D., CHAPPELL, W. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment. **Environmental Science & Technology**, v. 33, p. 3697–3705, 1999.

SHAHEEN, S.M., RINKLEBE, J. Geochemical fractions of chromium, copper, and zinc and their vertical distribution in floodplain soil profiles along the Central Elbe River, Germany. **Geoderma**, v. 228–229, p. 142–159, 2014.

SIERRA, M., MARTINEZ, F. J., AGUILAR, J. Baselines for trace elements and evaluation of environmental risk in soils of Almeria (SE Spain). **Geoderma**, v. 139, p. 209 – 219, 2007.

SILVEIRA, M. L., ALLEONI, L. R. F., O’CONNOR, G. A., CHANG, A. C. Heavy metal sequential extraction methods—a modification for tropical soils. **Chemosphere**, v. 64, p. 1929–1938, 2006.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 3050B - Acid digestion of soils, sediments and sludges**. Revision 2. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1996a.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 3060A - Alkaline digestion of hexavalent chromium, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods** - SW-846, U.S. Environment Protection Agency: Washington, DC, 1996b.

USEPA - United States Environmental Protection Agenc. **Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III - Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment**. Washington, DC, 2001. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/rags3adt_complete.pdf Acesso em: 19 Maio, 2016.

VOUTSA, D., SAMARA, C. Labile and bioaccessible fractions of heavys metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas. **Atmospheric Environment**, v. 36, p. 3583 – 3590, 2002.

WANG, Z., CHEN, J., CHAI, L., YANG, Z., HUANG, S., ZHENG, Y. 2011. Environmental impact and site-specific human health risks of chromium in the vicinity of a ferro-alloy manufactory, China. **Journal Hazardous Material**, v. 190, p. 980–985, 2011.

CONCLUSÕES GERAIS

O estado do Amazonas possui uma diversidade de solos ligada principalmente a compartimentação ambiental, como as áreas de várzea, terra firme e as áreas sobre o escudo cristalino, representado pelos escudo Brasil Central e das Guianas. A formação dos solos neste diferentes ambientes, imprimi características com uma riqueza mineral elevada até um pobreza química associada a presença de gibbsita.

Os solos de várzea encontra-se formados por sedimentos andinos e têm neste sedimento sua riqueza mineral, que condiciona estes solos um maior uso agrícola por parte das pequenas famílias que vivem as margens dos rios de água barrenta. Já os solos de terra firme, apresentam um pobreza mineral que limita seu uso agrícola. Nos solos de terra firme formados sobre sedimentos menos intemperizados, como a formação Solimões, encontra-se solo com uma fertilidade suficiente para promover o uso agrícola por pequenos períodos, enquanto que os solos encontrados sobre a formação alter do Chão esses períodos de uso do solo são mais curtos.

Nos solos formados a partir das rochas sedimentares mais intemperizadas como a formação Alter do Chão encontra-se a presença marcante de caulinita como principal mineral e alguns picos de gibbsita, sendo este mineral aparecendo com maior frequência nos solos formados a partir das rochas ígneas e metamórficas dos escudos Brasil Central e das Guianas.

O material de origem dos solos, muitos deles formados por sedimentos, refletem o baixo teor de metais pesados encontrados nos solos estudados, sendo somente os solos formados a partir de rochas ígneas e metamórficas que apresentam um teor mais elevado em comparação com os solos formados de material sedimentar. No entanto, fica evidente neste trabalho que metais pesados que apresentam maior mobilidade no perfil do solos são encontrados principalmente nos ambientes acumuladores, como os solos de várzea, enquanto que, os metais de menor mobilidade são encontrados nas áreas de terra firme.

Entre os solos encontrados em ambiente de terra firme, o teor de Cr foi superior aos limites estabelecidos pela legislação brasileira, no entanto, este elevado teor de início não apresenta problemas quanto a uma possível mobilidade das frações consideradas móveis, tendo em vista a sua baixa concentração nestas frações. No entanto, a ingestão de partículas mais finas deste solo, podem ser suficientes para promover severos danos a saúde humana.