

ANDERSON ALMEIDA PACHECO

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM SOLOS E SEDIMENTOS DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE POR METAIS PESADOS E SUA RELAÇÃO
COM O FUNDO GEOQUÍMICO NATURAL**

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
2015

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

T

P116a Pacheco, Anderson Almeida, 1981-
2015 Avaliação da contaminação em solos e sedimentos da bacia
 hidrográfica do Rio Doce por metais pesados e sua relação com
 o fundo geoquímico natural / Anderson Almeida Pacheco. –
 Viçosa, MG, 2015.

xi, 184f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.154-170.

1. Bacias hidrográficas - Rio Doce. 2. Metais pesados.
3. Mineralogia do solo. 4. Sedimentos. 5. Radiação
sincrotrônica. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Solos. Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de
Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 551.483

ANDERSON ALMEIDA PACHECO

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM SOLOS E SEDIMENTOS DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE POR METAIS PESADOS E SUA RELAÇÃO
COM O FUNDO GEOQUÍMICO NATURAL**

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: 31 de Março de 2015.



Prof. Diego Lang Burak



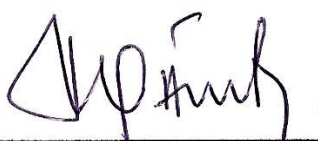
Prof. Igor Rodrigues de Assis



Prof. João Carlos Ker
(Coorientador)



Prof. Carlos Roberto Bellato



Prof. Mauricio Paulo Ferreira Fontes
(Orientador)

"Desistir... eu já pensei seriamente nisso, mas nunca me levei realmente a sério; é que tem mais chão nos meus olhos do que o cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos, do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça."

Cora Coralina

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Neste primeiro momento agradeço a Deus por esta grande graça que é este título de *Doctor Scientiae*. Agradeço por todos os dias desta jornada que ele me deu força, guiando meus passos e me dando coragem para continuar.

À minha família, em especial a meus pais Mario Pacheco e Cely Almeida Pacheco pelo amor incondicional, força e dedicação. A meus irmãos Antonio Carlos e Alessandra pelo amor, confiança e incentivo. A meus cunhados Heliete e Marcelo pelo carinho e apoio. Os meus queridos sobrinhos Brian, Bruna e Amanda pelo amor e alegria. A meu primo/irmão Vinícius pela confiança, carinho e amizade, e a toda a minha família pelas orações e força dadas a mim nesta jornada.

Ao CNPq pela concessão das bolsas de doutorado e doutorado Sandwish, possibilitando a concretização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, por proporcionar minha formação profissional e pela oportunidade de realização deste curso.

Ao professor Mauricio Paulo Ferreira Fontes, pela orientação, ensinamentos transmitidos, dedicação, críticas, sugestões, apoio e amizade que foram uma valiosa contribuição a minha formação profissional e pessoal.

Ao professor João Carlos Ker, pelo incentivo e confiança dados a mim durante todos estes anos que tive o prazer de aprender com seus ensinamentos, dos quais irão me guiar por toda a minha vida profissional.

Ao professor Scott Fendorf da Stanford University – USA pela grande oportunidade e aprendizado.

Aos professores Mauricio Paulo Ferreira Fontes, João Carlos Ker, Jaime Wilson Vargas de Mello, Victor Hugo Alvarez V., Hugo Alberto Ruiz, Raphael B. A. Fernandes, Genelício Crusoé Rocha, Walter Antônio Pereira Abrahão, Júlio César Lima Neves, Igor Rodrigues de Assis, Miguel Cooper, Roberto Ferreira de Novais, Leonardus Vergutz pelos valorosos ensinamentos durante suas disciplinas, as quais fortaleceram as bases do meu conhecimento.

Ao professor Leonardus Vergutz, pela amizade e incentivo durante este período.

Ao professor João Luiz Lani por me proporcionar grande aprendizado durante a graduação.

Aos eternos amigos da pós-graduação Barbara, Aline, Silmara, Maola, Diana, Julliany, Gislaine, Leo Jackson, Renato, Jaime, Belquior, Wedisson, Luiz Francisco, pelo convívio, apoio e amizade.

Aos amigos Gustavo, Juan, Ivan, Kristin, Michael, Jason, Sara, Debra, Guangchao da Stanford University que tive o prazer de conviver durante o período do Doutorado “Sandwish”.

Aos amigos/irmãos da “República Lucimar” Paulo Ricardo, Leonardo, Ricardo, Guilherme, Victor e da “República Bohemia” Paulo Roberto, Jonas, Luciano, Isaias e João pela paciência, amizade, companheirismo e muitas alegrias.

Aos eternos amigos da graduação Paulo Ricardo, Felipe “bob”, Pedro Matarazzo, Andreza, Juliana, Alan, João Paulo, Dalila Seni, Dalilla Resende, Lucas, Bruno, Tiago aos quais Declaro eternas saudades e agradeço pela amizade e alegria que me proporcionaram.

À minha grande amiga Rita Maria de Souza, pelo carinho, atenção, aprendizado, companheirismo, amor e acima de tudo por ser meu anjo da guarda.

Aos técnicos do Departamento de solos Claudio, Geraldo, Mario, José Francisco e Carlos Fonseca pela colaboração prestada nos laboratórios.

As secretarias do Departamento de Solos Luciana, Claudia, Sonia e Leiliane por sua atenção e ajuda.

BIOGRAFIA

ANDERSON ALMEIDA PACHECO, filho de Mario Pacheco e Cely Almeida Pacheco, nasceu em 29 de outubro de 1981, em Cachoeiro de Itapemirim – ES.

Graduado em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, em 2009. No período de 2005 a 2008 foi bolsista de Iniciação Científica (PIBIC-CNPq) sob a orientação do professor João Luiz Lani.

Em março de 2009, iniciou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, sob a orientação do professor João Carlos Ker, obtendo o título de *Magister Scientiae* em fevereiro de 2011.

Em março de 2011, iniciou o curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, sob a orientação do professor Mauricio Paulo Ferreira Fontes, realizou o Doutorado Sandwish na Stanford University – USA sob a orientação do professor Scott Fendorf, obtendo o título de *Doctor Scientiae* em março de 2015.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	01
2. REFERENCIAL TÉORICO	05
2.1. Mineralogia de sedimentos fluviais	05
2.2. Contaminação de solos e sedimentos fluviais por metais pesados	06
2.3. Radiação síncrotron nas ciências ambientais	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Caracterização da área de estudo	13
3.2. Seleção e coleta de amostras	15
3.3. Caracterização física	20
3.4. Caracterização química	21
3.4.1. Análises química	21
3.4.2. Fluorescência de raios-X	21
3.4.3. Dissolução seletiva de óxidos de ferro	22
3.5. Caracterização mineralógica	22
3.5.1. Difratometria de raios-X	22
3.5.2. Microscopia eletrônica de transmissão (MET)	23
3.6. Suscetibilidade magnética	23
3.7. Radiação síncrotron	23

3.7.1. X-ray absorption near edge structure spectroscopy (XANES)	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Atributos morfológicos e físicos	25
4.2. Atributos químicos	44
4.2.1. Química dos solos e sedimentos	44
4.2.2. Teores totais de óxidos pela fluorescência de raios-X	61
4.2.3. Extrações com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) e oxalato ácido de amônio (OAA)	70
4.3 Teores totais de metais pesados pela fluorescência de raios-X	84
4.4. Suscetibilidade magnética e sua relação com os metais pesados	118
4.5. Atributos mineralógicos	126
4.5.1. Mineralogia da fração argila	126
4.6. Espectroscopia de absorção de raios-X do cromo	145
5. CONCLUSÕES	152
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
APÊNDICES	171
Apêndice A – DRX da fração argila desferrificada	172
Apêndice B – DRX da concentração de óxidos	179
Apêndice C – Padrões NIST para metais pesados.....	184

RESUMO

PACHECO, Anderson Almeida, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2015. **Avaliação da contaminação em solos e sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce por metais pesados e sua relação com o fundo geoquímico natural.** Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Coorientador: João Carlos Ker

A bacia do rio Doce situa-se na região Sudeste integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste. Esta bacia, possui uma área de drenagem de aproximadamente 86.715 km², dos quais 86 % pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante ao Espírito Santo, abrangendo um total de 230 municípios. É uma área de grande importância econômica, política e social que necessita de pesquisas que contribuam para a gestão de recursos ambientais em prol do desenvolvimento sustentável. Ao longo do curso do rio Doce a atividade predominante é a agrícola, entretanto, é possível também observar diversas cidades e regiões industriais importantes, como é o caso do Vale do Aço mineiro. Neste contexto a bacia do rio Doce se insere em uma preocupação mundial sobre a contaminação por metais pesados e seus efeitos na degradação ambiental e impactos na saúde humana. Os objetivos deste estudo foram testar se as atividades humanas estabelecidas na bacia do rio Doce são responsáveis por altos níveis de metais pesados neste ambiente, e obter melhor compreensão dos processos de contaminação da bacia, a fim de melhorar a gestão dos recursos hídricos para o desenvolvimento sustentável desta bacia. Para se alcançar tais objetivos, a coleta foi realizada ao longo dos 853 km da calha principal do rio Doce. Foram coletados solos da parte alta da paisagem, Neossolos Flúvicos e sedimentos fluviais das margens esquerda e direita do canal do rio. Nestes materiais foram realizadas caracterizações físicas e químicas de fertilidade, dissolução seletiva dos óxidos de ferro pelos métodos do ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) e oxalato ácido de amônio (OAA),

teores totais de óxidos de Fe, Al, Si, Ti, Mn e os metais pesados V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba, Hg e Pb pela fluorescência de raios-X, difratometria de raios-X da fração argila, microscopia eletrônica de transmissão, suscetibilidade magnética e espectroscopia de absorção de raios-X pela radiação síncrotron. Ao se analisar os compartimentos coletados da bacia do rio Doce estes apresentaram alto grau de intemperismo com pH ácidos, baixa CTC, na sua maioria distróficos e presença de argila de baixa atividade. Os baixos teores de Fe extraídos pelo OAA dos solos resultaram em uma baixa relação Feo/Fed, indicando a presença de formas cristalinas dos óxidos de ferro, característico do elevado grau de intemperismo sofrido por estes materiais. Os teores totais dos metais pesados para os solos se apresentaram distintos ao longo da bacia do rio Doce. Os teores de As apresentaram concentrações muito baixas a nulas, com exceção do Cambissolo Háplico da região de Conselheiro Pena (MG) que apresentou teores variando de 50,4 a 119,1 $\mu\text{g g}^{-1}$ em superfície e subsuperfície respectivamente. A suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e a frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética por unidade de massa apresentaram grande variação entre as classes de solos e principalmente destas com os Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce. Nos Neossolos Flúvicos esta apresentou valores relativamente superiores aos dos solos da bacia do rio Doce, variando de 27,84 a 659,61 $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ para a fração TFSA. Correlação linear positiva foi observada entre a χ_{BF} da fração TFSA e Areia com os teores de Fe, V, Cr, Co, Ni e Cu e da fração argila com Fe, V, Co e Cu. Também se observou correlação positiva entre o Fe e o V, Cr, Co, Ni, Cu e Zn. Pela difratometria de raios-X da fração argila dos solos, solos aluvias e sedimentos da bacia do rio Doce foi possível observar similaridades na mineralogia destes materiais, sendo constituída basicamente por vermiculita, vermiculita com hidróxi-entrecamada, illita, caulinita, gibbsita, goethita e hematita. O fundo geoquímico natural foi determinado neste trabalho para a Bacia do Rio Doce, com destaque para os metais pesados V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba e Pb, que apresentaram valores acima da referência de qualidade (VRQs) para os solos de Minas Gerais. Os teores dos metais pesados analisados nos sedimentos do rio Doce não indicaram incremento expressivos nos pontos avaliados, quando se compara a coleta antes e depois de cidades e afluentes deste rio. Avaliando o Cr pela *X-ray absorption near edge structure spectroscopy* (XANES), utilizando a radiação síncrotron nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos, tal elemento apresentou-se como Cr(III) e não se encontrou o Cr(VI), sua forma tóxica.

ABSTRACT

PACHECO, Anderson Almeida, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2015. **Assessment of contamination in soils and sediments of the Doce river basin by heavy metals and its relationship with the natural geochemical background.** Adviser: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-adviser: João Carlos Ker.

The Doce River basin is located in the Southeast of Brazil and has approximately 86,715 km² of drainage area covering a total of 230 cities. It is an important economic, political and social area requiring studies that contributes to the better management of the environmental resources. Along the river the mainly economic activity is the agriculture, even though, there are several important cities and industrial regions, as an example, the Vale do Aço. In this context the Doce River basin is part of an international concern related to heavy metal contamination and its effects on environmental degradation and human health impacts. The objectives of this study were to evaluate whether human activities established in the Doce River basin are responsible for high levels of heavy metals in the environment and to have a clear picture about the basin contamination processes in order to improve the management of water resources. To achieve these objectives, the samples was taken over the 853 km of main Doce river channel and collected from the upper landscape soils, alluvial soils and fluvial sediments on the left and right edges of the river channel. The analyses consisted of physical and chemical fertility characterizations, selective dissolution of iron oxides by the methods of dithionite-citrate-bicarbonate (DCB) and ammonium oxalate (AAO), total content of Fe, Al, Si Ti, Mn and heavy metals V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Cd, Ba, Hg and Pb by X-rays fluorescence, X-ray diffraction of the clay, electron microscopy transmission, magnetic susceptibility and X-ray absorption spectroscopy by synchrotron radiation. It was observed a

high degree of soil weathering, with acid pH, low CEC, mostly dystrophic and presence of low activity clay. Low levels of iron extracted by the FAO soil resulted in a low ratio Fe_o/Fed , indicating the presence of crystalline forms of iron oxides, characteristic of the high degree of soil weathering. The total heavy metals contents in soils are presented in different patterns along of the Doce River basin. The magnetic susceptibility (χ_{BF}) and frequency dependent (χ_{FD}) magnetic susceptibility per unit mass varied widely between soil types. Alluvial soils showed relatively higher values of χ_{FD} ranging from 27,84 to 659,61 $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ for the TFSA fraction. Positive linear correlation was observed between χ_{BF} from the sand fraction with Fe, V, Cr, Co, Ni and Cu and clay with Fe, V, Co and Cu. We also observed a positive correlation between the Fe and V, Cr, Co, Ni, Cu and Zn. The X-rays diffraction showed similarities in the mineralogy of the clay fraction from alluvial soils and sediments of the Doce River basin, consisting primarily of vermiculite, vermiculite with hydroxy-interlayered, illite, kaolinite, gibbsite, goethite and hematite. The natural geochemical background was determined in this study for the Doce River Basin, especially to heavy metals V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba and Pb, which showed values above the reference quality (VRQs) for Minas Gerais soils. The heavy metals levels analyzed in sediments of the Doce River indicated no significant increment in the assessed points comparing before and after the collection of towns and tributaries of this river. Assessing the k-edge of the Cr by X-ray absorption near edge structure spectroscopy (XANES) using synchrotron radiation in soils, alluvial soils and sediments, we observed that Cr is present in Cr (III) form and not Cr (VI) the toxic one.

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Doce é uma área de grande importância econômica, política e social que necessita de pesquisas que contribuam para a gestão de recursos ambientais em prol do desenvolvimento sustentável. Suas águas são recursos hídricos de grande utilidade pública, pois são usadas para o abastecimento e saneamento públicos, além de possuírem elevada demanda pela indústria siderúrgica, agroindústrias, turismo e lazer.

De acordo com o CBH-DOCE (2009), uma análise dos processos de ocupação e crescimento econômico da bacia do rio Doce, concentrados principalmente nos últimos 50 anos, mostra que estes aconteceram de forma desordenada, sem levar em consideração os possíveis reflexos futuros e fazendo com que na zona rural se encontre hoje vastas áreas em estado avançado de desertificação, lagoas eutrofizadas, nascentes desprotegidas e processos erosivos. Além disto, mais de 90% da cobertura vegetal original foi extinta e do restante, menos de 1% encontra-se em estágio primário.

Ao longo do curso do rio Doce a atividade predominante é a agrícola, entretanto, é possível também observar diversas cidades e regiões industriais importantes, como é o caso do Vale do Aço mineiro. As diversas atividades praticadas na bacia do rio Doce exercem pressões sobre seus recursos gerando contaminações ambientais, tanto pela erosão, mineração e atividades agrícolas. A região de confluência com o rio Piracicaba até a divisa entre Minas Gerais e Espírito Santo apresenta o maior grau de degradação, seja ela física ou química. Assim, a bacia tem que ser encarada pelos órgãos públicos, cientistas e pesquisadores e população em geral, como uma importante reserva estratégica para o abastecimento da população urbana e rural, assim como para o

desenvolvimento de atividades econômicas, tornando-se cada vez mais imperativo, estudos que permitam o uso sustentável dessa riqueza natural.

Neste contexto, a bacia do rio Doce se insere em uma preocupação mundial sobre a contaminação por metais pesados e seus efeitos na degradação ambiental e impactos na saúde humana. Apesar de sua origem natural, os metais pesados apresentam como principal viés contaminante o *input* antrópico. Como fonte natural, sua ocorrência é determinada principalmente pelos materiais originários dos solos e também pela intensidade de intemperismo por eles sofridos. Via de regra, solos derivados de rochas máficas ou básicas e ultrabásicas apresentam maiores teores naturais destes metais, enquanto aqueles derivados de rochas ácidas, sedimentares e de sedimentos apresentam menores níveis. Os teores de metais pesados também são mais elevados quando os solos são formados *in situ*, sobre as rochas. Quanto ao intemperismo, aqueles menos intemperizados tendem a guardar maiores relações com o material que os originou e, portanto, a depender do material de origem, apresentam maiores valores naturais desses elementos. Quanto mais intemperizado o solo, menor deve ser esta relação com o material originário e, portanto deverá apresentar menores níveis do fundo geoquímico natural.

Alguns metais pesados podem ser considerados essenciais à vida, especialmente, como micronutrientes. Esse é o caso do Fe, Cu, Zn, Mn, Co, Mo, Se, B, Cr, Se, Sn e Ni. Desses, Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo e Ni são requeridos por plantas, enquanto que Co, Cr, Se e Sn apesar de não essenciais para elas, o são para os animais. Outros elementos como Pb, Cd, Hg, As, Ti e U não são requeridos por plantas e animais e têm seu estudo voltado principalmente pela sua grande toxicidade aos seres vivos. É importante também lembrar aqui que, mesmo aqueles metais essenciais aos seres vivos, os são em baixos teores e quando presentes em elevados níveis podem se tornar tóxicos (Alloway, 2013).

A toxicidade de uma substância depende de sua especiação, da via e do tempo de exposição. Quanto à especiação, têm-se como exemplos o mercúrio que na sua forma metilada é mais tóxico que o inorgânico e o arsênio no qual possui comportamento oposto. Apesar de variados, os sintomas e danos causados pelos metais pesados são provenientes de dois principais mecanismos de ação, quais sejam: a formação de complexos com grupos funcionais das enzimas e a combinação com as membranas celulares. As disfunções orgânicas causadas por tais elementos podem levar à morte e consistem principalmente

na alteração do perfeito funcionamento das enzimas, que controlam as reações metabólicas nos seres vivos. Os radicais SH (sulfidrilas), comuns nas enzimas, possuem grande afinidade pelos metais e os adsorvem. Isso altera significativamente o seu funcionamento e as consequências afloram como sintomas e malefícios à saúde. No tratamento de pacientes intoxicados, administram-se compostos (quelantes) capazes de adsorver os íons metálicos, ainda mais fortemente que as sulfidrilas, de forma a isolá-los no interior de proteínas ou favorecer a sua deposição na forma insolúvel de grânulos intracelulares ou ainda solubilizá-los, facilitando a sua excreção.

Sendo assim, é imprescindível aos órgãos públicos ambientais fiscalizadores conhecer o nível de referência (fundo geoquímico natural) desses elementos nos solos, para fins de definição, por exemplo, se uma determinada contaminação diagnosticada foi proporcionada por empreendimentos nas proximidades, ou pela riqueza natural dos solos da região. O valor do fundo geoquímico natural indica a concentração natural de uma substância (ou elemento) em solos que não tenham sofrido impacto antropogênico.

A definição dos valores de referência para os metais pesados deve ser efetuada considerando todas as classes de solos presentes e expressivas no Estado. As principais aplicações dessa variável é fornecer subsídio para a avaliação da qualidade dos solos e auxiliar no estabelecimento dos valores máximo permitidos, além de prover os órgãos ambientais de dados que os permitam balizar a disposição de resíduos de natureza diversa nos solos.

No estudo dos metais pesados, torna-se também relevante avaliar a forma em que eles estão presentes nos solos. Neste contexto, a Espectroscopia de Absorção de Raios-X (XAS) tem sido aplicada em numerosos trabalhos na ciência do solo, mineralogia e geoquímica. A Espectroscopia de Absorção de Raios-X foi desenvolvida na década de 70 e é largamente usada em instalações de radiação Síncrotron. Espectros XAS de alta qualidade podem ser coletados em misturas heterogêneas de gases, líquidos e ou sólidos com pequeno ou nenhum pré-tratamento das amostras, fazendo dele idealmente adequado para solos e muitos outros sistemas. A informação estrutural obtida do XAS é eficiente para identificar a especiação química de um elemento, incluindo mineral, sólidos não cristalinos ou fases adsorvidas.

Os metais pesados podem ser adsorvidos eletrostaticamente na superfície dos óxidos de ferro e alumínio, constituintes importantes dos solos

tropicais, ou podem ser adsorvidos especificamente, formando ligações parcialmente covalentes com os oxigênios da estrutura do mineral (Mc Bride, 1994). Desta forma, percebe-se que a composição mineralógica influencia sobremaneira a adsorção de metais pelos solos e sedimentos. Em solos tropicais, devido à sua constituição predominantemente oxídica, a adsorção de metais pesados é bastante intensa, pois os óxidos de Fe e de Al manifestam fortes interações com os metais pesados, ocorrendo tanto interações específicas como não específicas.

No presente trabalho, as seguintes hipóteses foram formuladas: (I) As atividades antrópicas realizadas na bacia do rio Doce são responsáveis pelos mais elevados teores de metais pesados neste ambiente; (II) Os teores de metais pesados presentes nos sedimentos de fundo antes e depois de cidades e afluentes indicarão estes como fontes de contaminação para o rio Doce; (III) a caracterização mineralógica dos solos e sedimentos irá proporcionar melhor entendimento das ligações existentes entre esses materiais e os metais pesados.

Os objetivos deste estudo foram testar se as atividades humanas estabelecidas na bacia do rio Doce pode contribuir como fonte dos teores dos metais pesados que possam a ser encontrados neste ambiente, e melhor compreender os processos de contaminação da bacia, a fim de melhorar a gestão dos recursos dos solos e hídricos para o seu desenvolvimento sustentável.

Diante de todo o contexto apresentado, os objetivos específicos deste trabalho são:

- I. Detectar e quantificar a concentração dos metais pesados V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba, Hg e Pb, em solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos da bacia hidrográfica do Rio Doce;
- II. Determinar os valores do Fundo Geoquímico Natural para a bacia hidrográfica do Rio Doce para os metais pesados elencados anteriormente;
- III. Verificar a influência antrópica nos processos de contaminação por metais pesados nos sedimentos da bacia do rio Doce;
- IV. Determinar a mineralogia de solos e sedimentos ao longo da bacia do rio Doce para uma melhor compreensão dos processos de adsorção e dessorção dos metais pesados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Mineralogia de sedimentos fluviais

Sedimentos fluviais desempenham importante papel no comportamento, bem como na avaliação das condições ambientais das bacias hidrográficas. Eles constituem a base para uma série de processos biogeoquímicos que ocorrem na interface sólida-líquida dos cursos d'água, podendo refletir a qualidade real do sistema aquático como um todo.

Neste sentido, a mineralogia dos sedimentos fluviais pode exercer papel preponderante em todas as reações físico-químicas que ocorrem nestes sistemas e merece, cada vez mais, atenção especial que deve ser dada por meio de trabalhos de pesquisa conduzidos em importantes bacias hidrográficas.

Na literatura brasileira existem alguns trabalhos que tratam de mineralogia de sedimentos diversos, tais como de pacotes sedimentares que originam solos (Mello et al., 2002), de sedimentos de fundo de lago (Maia et al., 2005), de sedimentos pelíticos da plataforma continental do Amazonas (Lima et al., 2005) e de sedimentos de manguezais da costa Amazônica (Berrêdo et al., 2008). Eles tratam de mineralogia de sedimentos diversos, mas não sedimentos fluviais.

Com relação aos sedimentos fluviais existem alguns trabalhos que avaliaram sua contaminação por metais pesados (Jordão et al., 1990; Colonese et al., 2010), que monitoraram a concentração dos sedimentos em suspensão (Vestena et al., 2007), determinaram a distribuição de nutrientes

(Silva et al., 2010), analisaram a influência de poluentes inorgânicos na qualidade de sedimentos urbanos (Poletto, 2007) e estudaram a influência do aporte de sedimentos fluviais na qualidade das águas superficiais de córregos de bacias hidrográficas (Pinto et al., 2009). Os trabalhos que tem um enfoque mais voltado para mineralogia são raros e pode-se citar Lana & Castro (2008) que fizeram a interligação de mineralogia/petrografia com a análise sedimentológica textural e Lemes et al. (2003) que verificaram a influência da mineralogia dos sedimentos de bacias hidrográficas na composição química das águas de abastecimento público.

Em síntese, são raros os trabalhos na literatura relativos aos estudos da mineralogia dos sedimentos fluviais e sua relação com os problemas de poluição e, ou contaminação por metais pesados, especialmente na bacia hidrográfica do Rio Doce.

2.2. Contaminação de solos e sedimentos fluviais por metais pesados

Devido à elevada capacidade de reter íons e moléculas, o solo pode funcionar como importante meio adsorvente para os metais pesados. Essa capacidade varia com suas características físico-químicas e as características do metal considerado, razão pela qual, caracterizando-se o potencial adsorvedor do solo, dá-se um passo significativo para a estimativa da migração de solutos no perfil e do potencial de contaminação das águas subterrâneas.

O tema central da poluição de sedimentos e águas por metais pesados está ligado a processos de acúmulo e transporte dessas espécies e de suas interações com a fase sólida dos solos e líquida dos corpos d'água. Nos solos, as interações são distintas e com diferentes graus de complexidade, envolvendo reações tais como adsorção, dessorção, complexação, troca com a fase sólida, dissolução, precipitação e oxirredução dos metais envolvidos. Em um ambiente aquático, os íons dos metais pesados estão sujeitos a reações de precipitação, complexação ou adsorção e solubilização, dependendo das características físicas e químicas dos corpos d'água (Morgan e Stumm, 1991).

Os sedimentos constituem uma “armadilha” para poluentes e tem demonstrado ser uma ferramenta eficiente para identificar impactos ambientais. Por isso, eles são considerados um meio muito importante de medir o nível de

contaminação de corpos d'água pela sua habilidade em acumular metais e compostos orgânicos (Frohener et al., 2009)

O conhecimento das reações e da cinética envolvidas nesses processos é de vital importância no controle das concentrações de metais pesados e de suas mobilidades nos solos, sedimentos e corpos d'água, e permite ainda estabelecer modelos preditivos de sua toxicidade para plantas e para organismos aquáticos, assim como, de sua entrada na cadeia trófica humana e de seu potencial de contaminação de solos, aquíferos, rios, lagos e mares.

Muitos trabalhos avaliam a adsorção de metais pesados por argilas silicatadas, óxidos ou compostos orgânicos utilizando sistemas puros no intuito de se fazer previsões para solos e sedimentos. Nestes trabalhos, a adsorção tem sido descrita como resultado de dois mecanismos: adsorção não específica, onde os íons interagem eletrostaticamente com a superfície dos coloides e adsorção específica, que é o resultado da complexação dos íons por essas superfícies (Forbes et al., 1976; McKenzie, 1980; Yong et al., 1990; Spark et al., 1995).

A adsorção não-específica pode ser entendida como o fenômeno de retenção de cátions e/ou ânions em superfície por uma simples atração eletrostática (Sposito, 1984). Em outras palavras, cátions são atraídos pelas cargas negativas superficiais e ânions pelas positivas. Também conhecida pela formação de complexos de esfera externa (onde há interposição de pelo menos uma molécula de água entre o grupo funcional e o íon), nesse caso não ocorrem ligação de coordenação, diminuindo, assim, a energia da ligação quando comparado à adsorção específica. Esse tipo de adsorção é, portanto, altamente dependente das cargas geradas na matriz mineral dos solos. A CTC e a CTA podem então ser consideradas como determinantes para ocorrência de tal fenômeno. Solos muito intemperizados tendem a ter baixa CTC, conferida principalmente pela caulinita e pela matéria orgânica. Como a maior parte dos elementos-traço apresenta-se normalmente como cátions metálicos, esse tipo de ligação metal-complexo de troca reduz-se em importância para tais solos.

Graças à mineralogia oxidica de boa parte dos solos típicos de regiões tropicais úmidas, especialmente os Argissolos e Latossolos, as interações entre óxidos e elementos-traço são de grande importância. Essas interações são em sua maioria do tipo adsorção específica, que se verificam sem a interposição de moléculas de água entre íons e matriz sólida formando complexos de esfera

interna. Nesses, ocorre a combinação de ligações covalentes e iônicas (Sposito, 1984). Esse fenômeno também é conhecido como quimiosorção. Ao contrário da adsorção não-específica, esse tipo de interação é restritivo a alguns íons específicos em superfícies específicas. A partir dela formam-se fortes ligações, praticamente irreversíveis, onde a dessorção é desfavorecida. São responsáveis, portanto, pela imobilização de elementos-traço e, em consequência, apresentam importância acentuada para redução do seu risco toxicológico. É de grande interesse então entenderem-se os mecanismos que cercam esse tipo de ligação. McBride (1994) discute que a liberação de elementos-traço especificamente adsorvidos apresenta histerese, ou seja, tende a se manter estável sem a presença do estímulo que a gerou. Em outras palavras a reação de dessorção tende a ser lenta ou incompleta, requerendo grande energia de ativação.

Diversos autores, entre eles Sposito (1984), Alloway (1990a) e McBride (1994) citaram evidências de ocorrência de adsorção específica entre cátions metálicos e matriz sólida componente do solo. Entre elas pode-se citar: a ocorrência de adsorção mesmo em pHs abaixo do PCZ do solo, ou seja, quando cargas positivas predominariam; a observação de menores taxas de dessorção em relação as de adsorção e a dificuldade de dessorção desses cátions mesmo quando a força iônica da solução do solo é fortemente modificada.

Portanto, o entendimento de como elementos-traço se comportam em solos passa necessariamente pelo entendimento dos fenômenos de sorção. Especialmente pelo entendimento das duas principais formas de acontecimentos de adsorção, a específica e a não-específica ou como também citadas na literatura, a formação de complexos de esfera interna e externa, respectivamente.

O entendimento de tais fenômenos, de certa forma, já induz respostas do comportamento dessoritivo desses elementos. Alloway (1990b) inferindo sobre isso cita que a adsorção não-específica é um fenômeno estequiométrico e reversível, enquanto que a adsorção específica se caracteriza por ser um fenômeno não estequiométrico e irreversível. A irreversibilidade, no caso dessa última, implica dizer que os elementos dessa forma retidos são de difícil liberação e, portanto, de difícil dessorção.

Os minerais de argila, principalmente a caulinita, os óxidos de Fe (goethita e hematita) e de Al (gibbsita) constituem os principais sedimentos finos em rios

brasileiros e apresentam uma grande variedade de sítios de adsorção. Mesmo que a fração areia seja a predominante nos sedimentos, esta fração fina (caulinita e óxidos de Fe e de Al) estão presentes. A caulinita apresenta três planos morfológicos externos que expõem diferentes grupamentos funcionais OH de superfície (Greenland e Mott, 1978; Sposito, 1989; 1992; Stumm, 1992; Fontes, 1996; Fontes et al. 2001), os quais são importantes sítios de adsorção para os metais pesados.

Os óxidos de Fe e de Al, designação genérica para óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos, são componentes do solo que desempenham importante papel na imobilização dos metais pesados (Kuo et al., 1985; Elliot et al., 1986; Slavek e Pickering, 1988; Hsu, 1989; McKenzie, 1989; Schwertmann e Taylor, 1989). Esses óxidos são constituintes importantes dos solos tropicais (Kampf e Schwertmann, 1983; Fontes e Weed 1991, 1996) e, conseqüentemente, importantes sedimentos em cursos d'água. Os metais pesados podem ser adsorvidos eletrostaticamente na superfície dos óxidos ou podem ser adsorvidos especificamente, formando ligações parcialmente covalentes com os oxigênios da estrutura do mineral (McBride, 1994).

Desta forma, percebe-se que a composição mineralógica influencia sobremaneira a retenção de metais pelos solos e sedimentos. Em solos tropicais, devido à sua constituição predominantemente oxídica, a adsorção de metais pesados é bastante intensa, pois os óxidos de ferro e alumínio manifestam fortes interações com os metais pesados (Shuman, 1977; Naidu et al., 1997, 1998), ocorrendo tanto interações específicas como não específicas. Gomes et al. (1997), estudando a adsorção de metais em um Latossolo Vermelho-Amarelo, verificaram que Cd, Cu, Pb e Ni foram adsorvidos de ambas as formas, mas o Cr foi adsorvido, em grande parte, de forma específica.

A matéria orgânica, quando presente em solos e sedimentos, apresenta efeitos pronunciados nas reações químicas do solo e é de grande importância na retenção e mobilidade dos metais pesados no solo (Spark et al., 1995).

O risco que os metais pesados representam está intimamente ligado com a mobilidade dos mesmos, que por sua vez é dependente da retenção, mobilização e transporte de metais pesados. Em outras palavras, é dependente de características do próprio elemento que podem influenciar significativamente sua mobilidade, como o estado de oxidação, por exemplo, da capacidade de adsorção e dessorção dos solos, troca iônica e precipitação em novas fases

sólidas. O tipo e força de ligação dos elementos-traço com os componentes do solo também são determinantes da mobilidade dos mesmos, sendo dependentes, entre outras, do teor e qualidade de matéria orgânica, do teor e cristalinidade de óxidos, além de fatores físico-químicos como pH e/ou força iônica.

A presença de matéria orgânica solúvel pode aumentar a mobilidade de elementos-traço em solos e causar menor retenção. Por outro lado, a formação de complexos insolúveis podem ocasionar retenção acentuada deles, especialmente Cu e Pb. Em solos intemperizados de regiões tropicais, os componentes caulinita e, principalmente, óxidos de ferro e alumínio, se associam em importância à matéria orgânica na retenção dos metais pesados (Alloway, 1990, Matos et al., 1996, Fontes et al., 2000, Matos et al., 2001, Meurer, 2004, Soares, 2004). A importância dos óxidos de ferro, alumínio e manganês é ressaltada também por Tack et al. (2006) e Cappuyns & Swennen (2006).

Gomes et al. (2001) estudando a adsorção competitiva de elementos-traço em solos brasileiros encontrou a seguinte ordem $\text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Ni}$ e $\text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Zn}$. Outros trabalhos, como o de Kinniburgh et al. (1976), McKenzie (1980), Grossl & Sparks (1995), Matos et al. (1996), Fontes et al. (2000), Matos et al. (2001), Gomes et al., 2001, Fontes & Gomes (2003), Agbenin & Latifatu (2004), Nascimento & Fontes (2004), Soares et al. (2004), Campos et al. (2007), Pierangeli et al. (2007), Villalobos & Pérez-Gallegos (2008) têm encontrado ordens semelhantes. As modificações mais frequentemente constatadas ocorrem entre Pb e Cu e Zn, Ni, Co e Cd. De modo geral, o Pb tende a apresentar-se mais fortemente atraído pela hematita, e o Cu liderar a lista em ambientes ricos em goethita e matéria orgânica. Revisão sobre adsorção competitiva de metais pesados foi publicada recentemente por Fontes (2012).

2.3. Radiação síncrotron nas ciências ambientais

Desde que a espectroscopia de absorção de raios-X (XAS) foi introduzida há mais de 30 anos, ela tem se tornado a técnica da escolha para determinação do ambiente local de coordenação de elementos específicos em sólidos, tanto cristalinos quanto amorfos. Devido à sua habilidade de examinar amostras *in situ* com preparação mínima, a XAFS tem se tornado o mais importante método para especiação de poluentes ambientais como Zn, Pb e As, frequentemente

presentes em amostras naturais (Brown Jr. et al., 2005). Vários trabalhos têm utilizado a radiação de síncrotron em suas diversas formas para estudar a adsorção de metais pesados e oxianions em superfícies minerais, especialmente, os óxidos de Fe (Fendorf et al., 1994;1994b; 1997; O'Day et al., 1994; Ladeira et al., 2001; Peacock & Sherman, 2004; Khare et al., 2007; Kelly et al., 2008).

A Espectroscopia de Absorção de Raios-x (XAS) tem sido aplicada em numerosos trabalhos na ciência do solo, mineralogia e geoquímica. Foi desenvolvida na década de 70 (Sayers et al., 1971) e é largamente usada em instalações de radiação síncrotron.

A luz síncrotron é uma radiação eletromagnética emitida por partículas relativistas carregadas movendo-se numa órbita fechada, geralmente circular (Winick & Doniach, 1980). As luzes síncrotron por apresentarem um espectro contínuo e de alta intensidade, desde o infravermelho até a região dos raios-X, tornou-se uma poderosa ferramenta de caracterização, tanto para o uso científico como tecnológico, em áreas como da ciência dos materiais, cristalografia, física das superfícies, química, geoquímica, biofísica e medicina (Henderson, 1997).

Espectros XAS de alta qualidade podem ser coletados em misturas heterogêneas de gases, líquidos e, ou, sólidos com pequeno ou nenhum pré-tratamento das amostras, fazendo deles idealmente adequados para solos e muitos outros sistemas. A informação estrutural obtida do XAS é eficiente para identificar a especiação química de um elemento, incluindo mineral, sólidos não cristalinos ou fases adsorvidas.

A determinação da especiação do elemento e sua distribuição no interior de sistemas ambientais heterogêneos, tais como solos, é crucial para o desenvolvimento de uma compreensão completa de processos do solo e mecanismos de reação que não controlam apenas o transporte de nutrientes e contaminantes, mas também processos de biomineralização e de formação do solo. A aplicação de numerosas técnicas espectroscópicas e de análises é necessária para resolver estes e outros problemas complexos que os cientistas do solo tem enfrentado nas últimas décadas. Estas técnicas incluem a espectroscopia de absorção de raios-X (XAS) (Brown et al, 1997, Schulze & Bertsch, 1995; Sparks, 2005; Faíscas e Borda, 2008), infravermelho com transformação de Fourier (FTIR) (Hind et al., 2001), Raman (Johnston e Wang,

2002), ressonância magnética nuclear (RMN) (Bleam, 1991), ressonância paramagnética eletrônica (EPR) (Flogeac et al., 2004), e de espectroscopia Mössbauer (McCammon, 2004). Complementarmente a estas técnicas espectroscópicas, se tem a microscopia eletrônica de varredura e de transmissão (SEM e TEM), microscopia de força atômica (AFM) (Cail & Hochella, 2005).

Durante as duas últimas décadas, XAS tornou-se uma técnica consolidada para a obtenção da especiação (por exemplo, estado de oxidação) e estrutura de curto alcance de elementos presentes em solos e sedimentos. A sigla XAS abrange tanto a espectroscopia XANES (X-ray absorption near edge structure) e EXAFS (Extended X-ray absorption fine structure). A espectroscopia XANES pode ser usada para determinar o estado de valência e a geometria de coordenação, enquanto a EXAFS pode ser usada para determinar a estrutura molecular local de um elemento particular dentro da amostra. A utilização da polarização de raios-x permite que o ambiente atômico do absorvedor seja examinado na direção de polarização e é particularmente adequado para os minerais tais como os filossilicatos e óxidos. Esta informação permite a determinação exata do estado de oxidação, o tipo de vizinhos mais próximos, número de coordenação, distância de ligação e simetrias orbitais da radiação absorvente. Fendorf (1999) e Kelly et al. (2008) fornecem uma discussão detalhada para a aplicação de XAS para solos, argilas e ciências ambientais e incluindo resumos de base física, considerações experimentais e técnicas de análise de dados. O mapeamento químico pela fluorescência de raios-X (FRX) ajuda a determinar as áreas de interesse a serem analisados em combinação com μ -DRX, μ -XANES e μ -EXAFS.

Na década anterior verificou-se um rápido aumento no número e na variedade de usuários que estão utilizando as instalações do síncrotron para pesquisas em diferentes áreas do conhecimento. Uma que tem-se destacado é a ciência do solo e ambientais. Recentemente excelentes trabalhos sobre a utilização da radiação síncrotron nas ciências ambientais foram publicados. Estas publicações tiveram como foco a ciências ambientais (FIntroduza et al., 2002), ciências do solo (Schulze et al., 1999), a interpretação dos dados coletados a partir de sistemas ambientais (Kelly et al., 2008) e o estudo de metais pesados no meio ambiente (Sparks, 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Doce (Figura 1) encontra-se em sua totalidade no Domínio dos Mares de Morros Florestados, constituindo um cenário de paisagens movimentadas, com solos muito intemperizados e dissecação pronunciada, em altitudes variáveis desde 60 até mais de 2.850 m (Ab'Saber, 1966; Ab'Saber, 1970; Ab'Saber, 1996).

A bacia hidrográfica do rio Doce está situada na região Sudeste, entre os paralelos 18°45' e 21°15' de latitude sul e os meridianos 39°55' e 43°45' de longitude oeste, compreendendo uma área de drenagem de cerca de 83.400 km², dos quais 86 % pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante ao Estado do Espírito Santo. Limita-se ao sul com a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a oeste com a bacia do rio São Francisco e, em pequena extensão, com a do rio Grande. Ao norte, limita-se com a bacia dos rios Jequitinhonha e Mucuri e a noroeste com a bacia do rio São Mateus (CBH- DOCE, 2012).

Segundo a classificação de Köppen, identificam-se basicamente três tipos climáticos na bacia: (I) clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, presente nas vertentes das serras da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; (II) clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, presentes nas nascentes de seus afluentes; e (III) clima quente com chuvas de verão, presentes nos trechos médio e baixo do rio Doce e de seus afluentes.

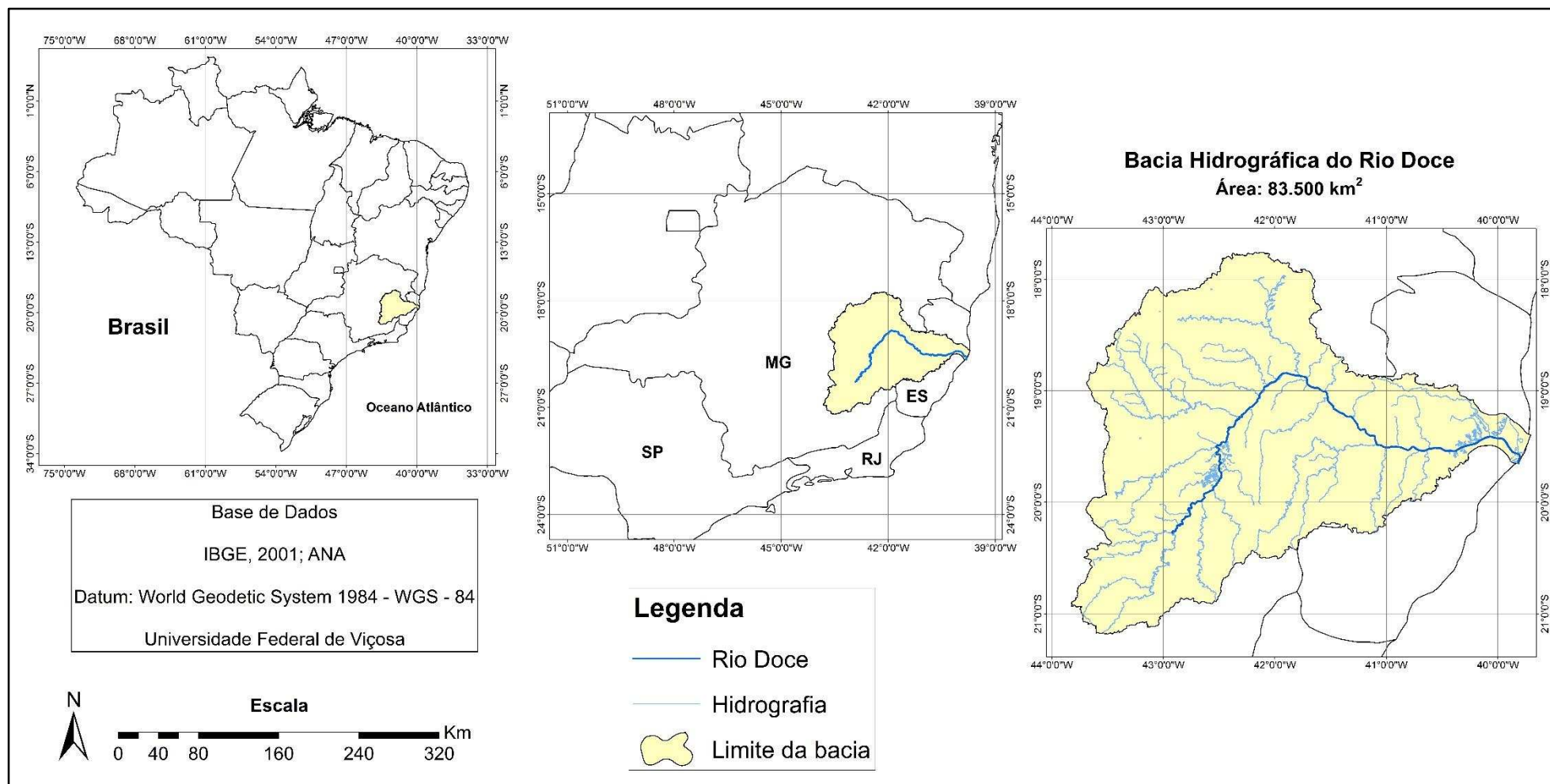


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do rio Doce.

A bacia hidrográfica do rio Doce, em sua porção mineira, constitui-se em clássico exemplo de bacia hidrográfica controlada pela estrutura Pré- Cambriana herdada e impressa na sequência de rochas ígneas ou metamórficas de alto grau, direcionadas a uma drenagem Atlântica pós-Cretácea e sujeita a diversos períodos de tensões e compressões que geraram uma forte segmentação tectônica na bacia (Radambrasil, 1984; Radambrasil, 1987; Fernandes Filho et al., 2010). Na porção capixaba, é formada pelas unidades cenozóicas, dentre elas a formação Barreiras, coberturas terciárias, quaternário costeiro e os depósitos aluvionares (PIRH-DOCE, 2010; CPRM, 2013).

3.2. Seleção e coleta de amostras

A coleta de amostras foi realizada ao longo dos 853 km da calha principal do rio Doce. Este por sua vez possui sua nascente no encontro do rio Piranga e rio do Carmo no Estado de Minas Gerais e sua foz no estado do Espírito Santo. Foram coletados solos da parte alta da paisagem, Neossolos Flúvicos e sedimentos fluviais das margens esquerda e direita do canal do rio.

Para os sedimentos fluviais foi utilizado um coletor de testemunho cilíndrico de PVC com 9 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento. Este coletor foi desenvolvido originalmente por Ambuhl & Buhner (1975), modificado por Esteves & Camargo (1982) e novamente modificado para o presente estudo (Figura 2). Esta modificação foi realizada por meio de solda de uma haste de ferro galvanizado com regulagem de altura a cada 1 m podendo chegar a 10 m. Este coletor é do tipo gravidade e foi inicialmente desenvolvido para coleta em ambientes lênticos (lagos e represas), mas como a condição de coleta no rio Doce é um ambiente lótico (de correnteza), esta adaptação foi necessária.



Figura 2. Representação do coletor de sedimento Ambuhl & Buhner (1975) com adaptação para o presente trabalho. Este coletor é bastante similar ao denominado Kajak-Brinkhurst citado por Mudrock & Macknight (1994).

Os pontos selecionados para a coleta de sedimentos seguiram as principais cidades e a foz de alguns dos afluentes do rio Doce ao longo de sua calha principal (Figura 4). Para cada ponto foram coletadas duas amostras de sedimento no perfil transversal do rio (margem esquerda e direita) (Figura 3), sendo estas coletadas antes e depois de cada ponto definido, no intuito de se avaliar a contribuição da contaminação por metais pesados dessas localidades. Após a coleta com o testemunhador de PVC, estas foram seccionadas de 10 em 10 cm (Figura 2) ou seguindo uma diferenciação de textura em profundidade. Estas amostras foram armazenadas em sacos plásticos, identificadas e sua localização georreferenciada.

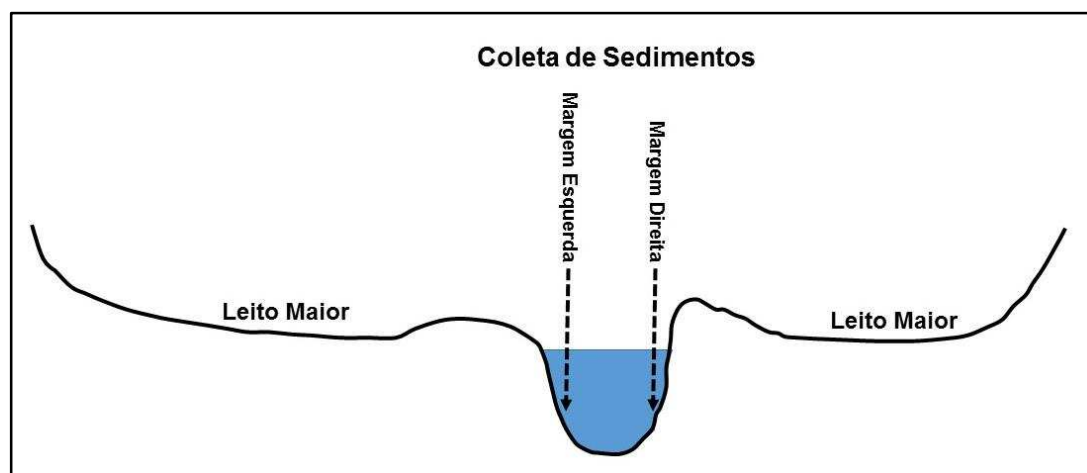


Figura 3. Esquema da coleta de sedimentos no perfil transversal do rio Doce.

Os Neossolos Flúvicos foram coletados com influência direta com as margens do rio doce. Assim, 11 perfis completos foram amostrados até uma profundidade média de 150 cm (Figura 5 e 6). Os solos da parte alta da paisagem foram amostrados nas diversas classes de solos existente da bacia em áreas de APP's com floresta secundária. Dentre elas, Latossolos Amarelos e Vermelhos, Argissolos Vermelhos e Cambissolos. Estes foram amostrados nas profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm com um trado holandês, totalizando 11 perfis. Sendo que para cada perfil se coletou 5 amostras simples perfazendo uma amostra composta para cada profundidade amostrada com uma distância média entre elas de 5 m, conforme recomendado por FEAM (2013). Uma vez que estes forneceram os valores de referência para os teores de metais pesados para o presente trabalho. Tanto os solos da parte alta e Neossolos Flúvicos foram coletados ao longo de todo o canal do rio (Figura 4).

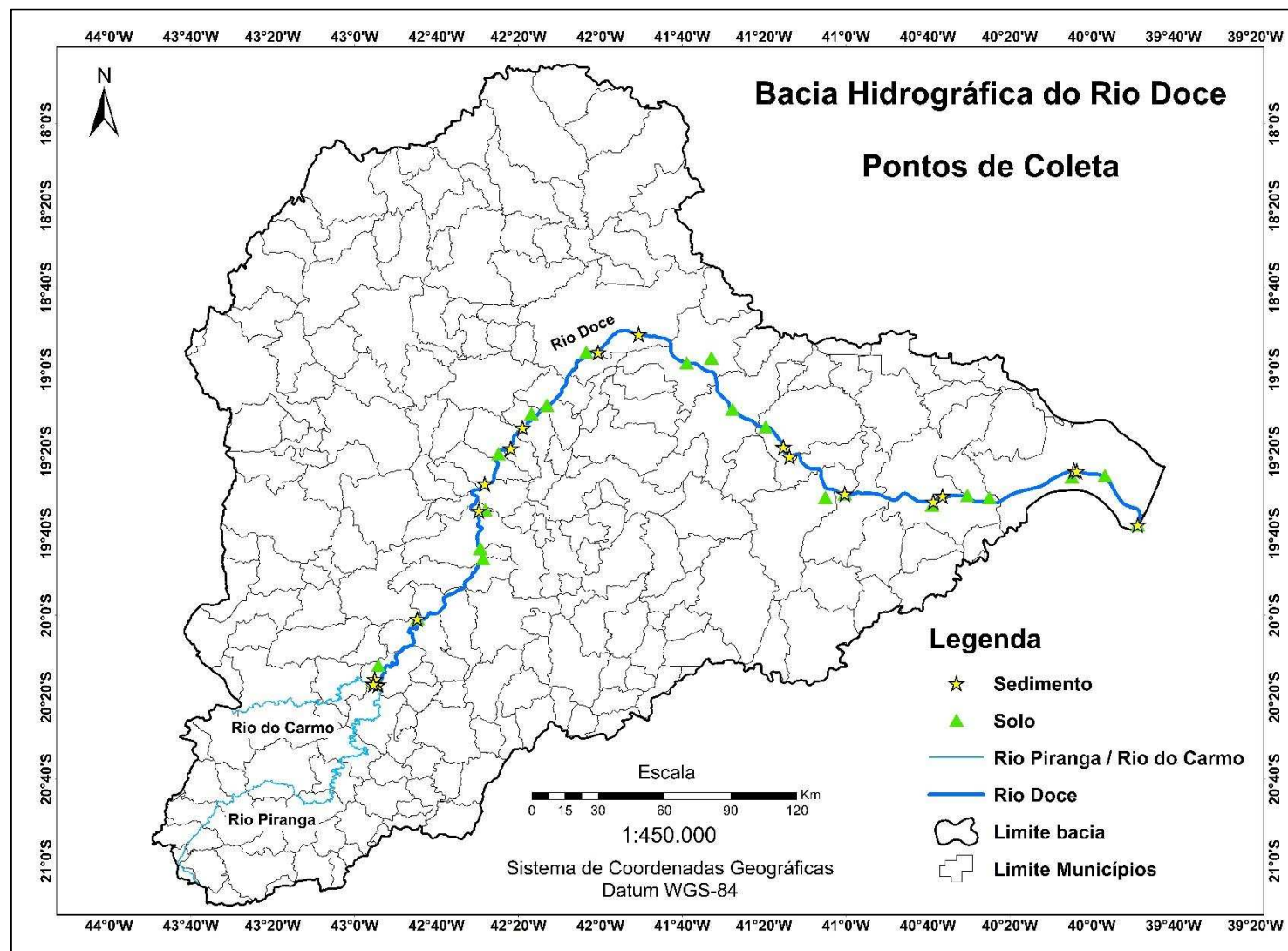


Figura 4. Mapa com a distribuição dos pontos de coleta dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos na bacia do rio Doce.

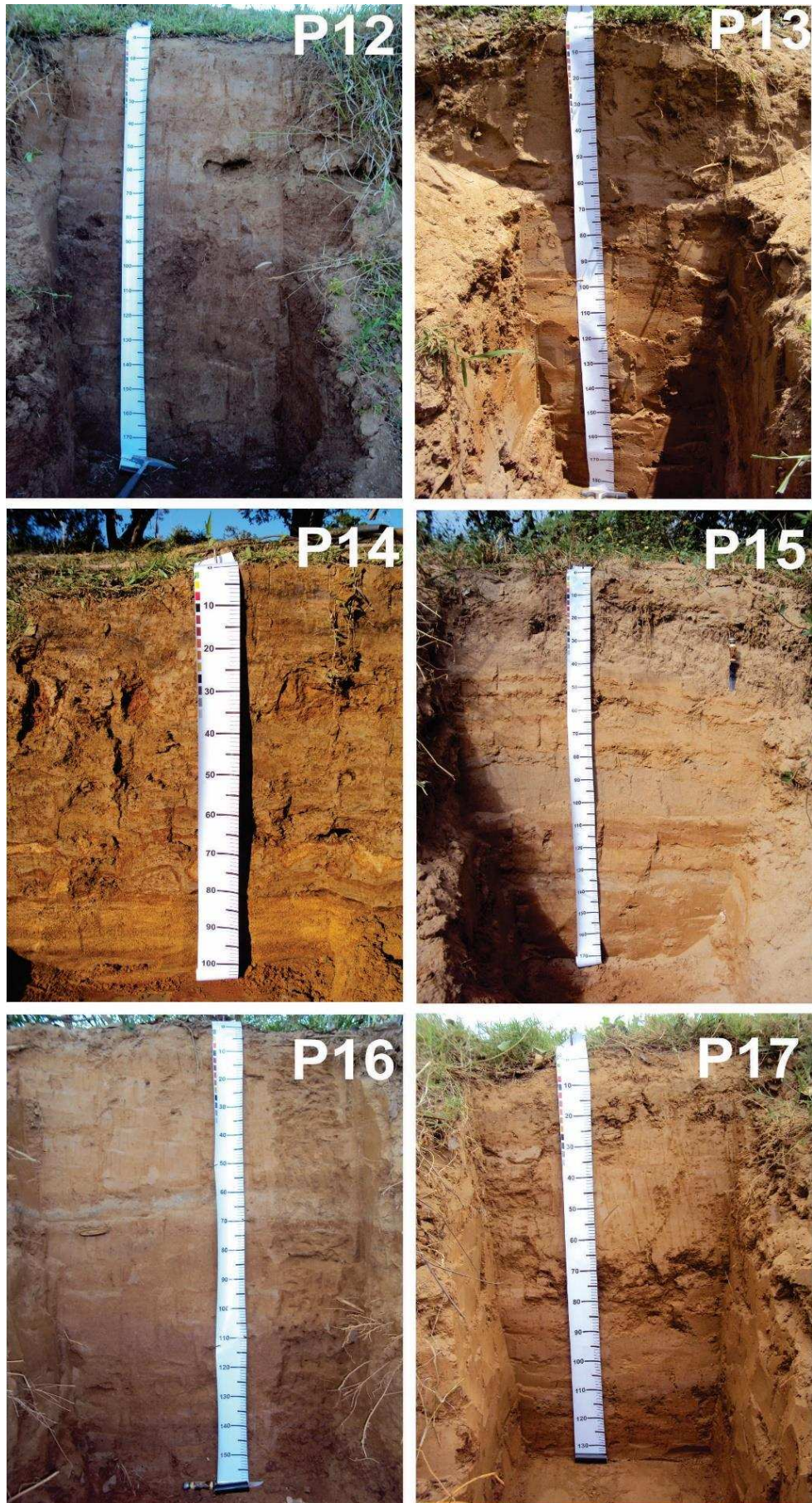


Figura 5. Perfis de Neossolos Flúvicos amostrados na bacia do rio Doce.

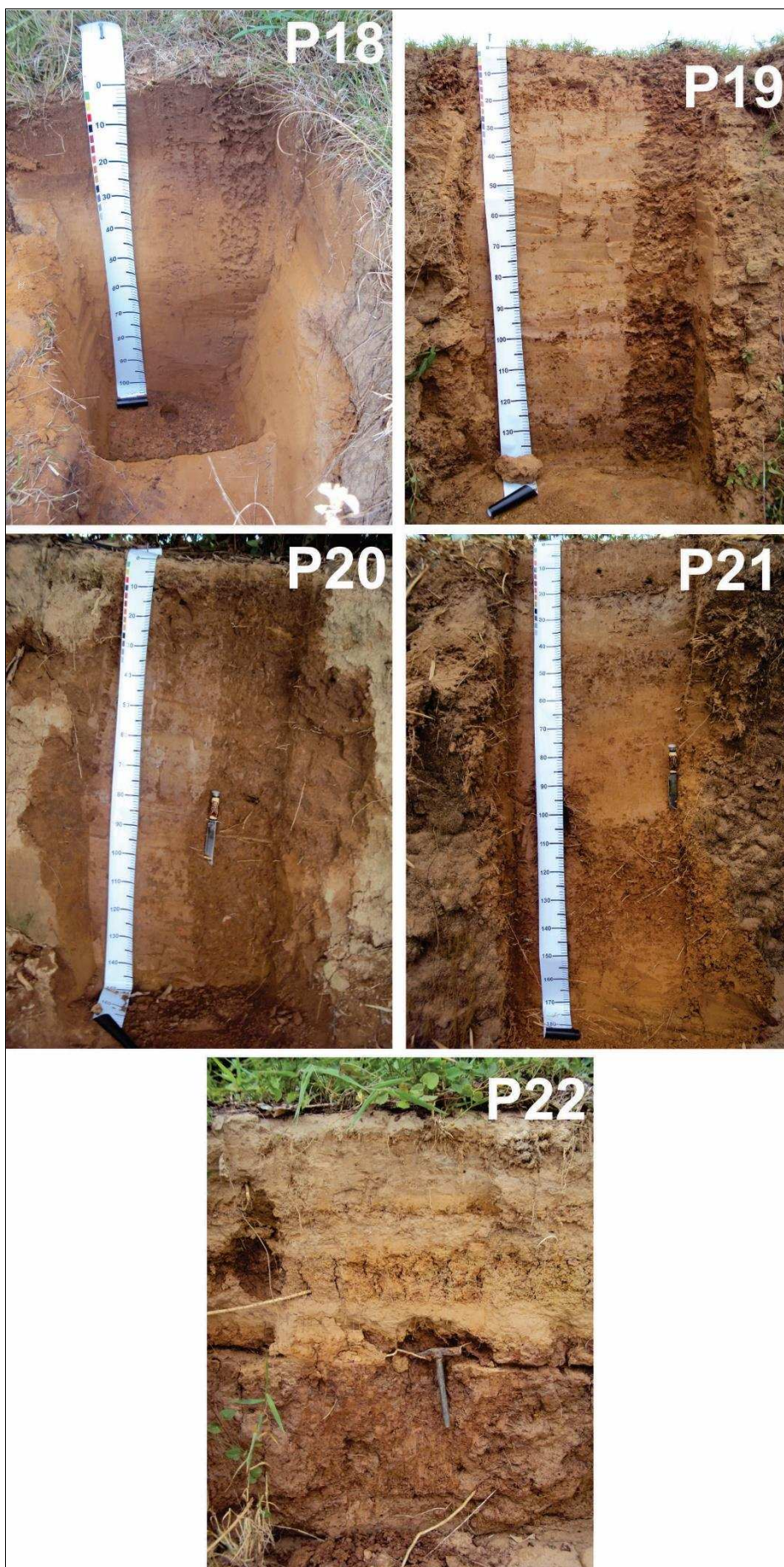


Figura 6. Perfis de Neossolos Flúvicos amostrados na bacia do rio Doce.

Os solos da parte alta e os Neossolos Flúvicos foram georreferenciados, descritos morfologicamente de acordo com Santos et al. (2013) e classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2013). Todas as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA) para fins de caracterização física, química e mineralógica.

Para fins de discussão e comparação entre os teores de metais pesados nos diferentes pontos de coleta, agrupou-se os solos da parte alta, Neossolos Flúvicos e sedimentos, em “ÁREAS” por proximidade de coleta. Estas áreas foram enumeradas a partir na nascente do rio doce, na foz do rio Piranga e do Carmo em: Área 1 (nascente do Rio Doce no encontro do Rio Piranga e do Rio do Carmo - MG); Área 2 (montante do Rio Casca - MG); Área 3 (região da Cidade de Ipatinga - MG); Área 4 (região da Foz do rio Santo Antônio - MG); Área 5 (região da cidade de Governador Valadares - MG); Área 6 (região da cidade de Tumiritinga - MG); Área 7 (região da cidade de Resplendor - MG); Área 8 (região da cidade de Baixo Guandu - MG); Área 9 (região da cidade de Colatina – ES); Área 10 (região da cidade de Linhares – ES); Área 11 (região da cidade de Regência – ES).

3.3. Caracterização física

As composições granulométricas das amostras foram determinadas após a individualização das partículas minerais por meio da associação da dispersão física (agitação lenta) e da dispersão química (NaOH). Se adicionou 20 g de TFSA + 100 mL de água destilada + 25 mL de NaOH 1 mol L⁻¹ em garrafas plásticas de 500 mL. Esse material foi levado a um agitador vertical do tipo Wagner por 16 horas a 50 rpm. A separação e quantificação das frações areia grossa (2,0 – 0,21 mm) e areia fina (0,21- 0,05 mm) foi realizada por peneiramento e pesagem e das frações menores (silte e argila) por meio da sedimentação pelo método da pipeta (Embrapa, 2011).

3.4. Caracterização química

3.4.1. Análise química

As análises químicas constaram de pH em água e em solução de KCl 1 mol L⁻¹ relação 1:2,5; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ trocáveis - extraídos com KCl, quantificados por espectrofotometria de absorção atômica (Ca e Mg), e o Al³⁺ por titulação com solução NaOH 0,025 mol L⁻¹; Na, K e P disponível - extraídos com solução Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹); sendo Na, K quantificados por fotometria de chama; e o fósforo disponível por colorimetria; acidez potencial (H + Al) - extraída com acetato de cálcio a pH 7, quantificada por titulometria (Embrapa, 2011). A partir desses resultados, calcularam-se a soma de bases (valor S), capacidade de troca catiônica (t efetiva e T pH 7,0); capacidade de troca catiônica corrigida pela argila (CTCr) calculada pela expressão: $T(\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) \times 1000 / \text{conteúdo de argila (g kg}^{-1})$; saturação por bases (V %); alumínio (m %) e ΔpH (pH KCl – pH H₂O). O fósforo remanescente foi determinado de acordo com Alvarez V. et al. (2000) e os teores de carbono orgânico total (COT) por oxidação via úmida, utilizando-se solução de K₂Cr₂O₇ em meio ácido, com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988).

3.4.2. Fluorescência de raios-X

Os teores totais de Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ e MnO₂, como também dos metais pesados V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba, Hg e Pb foram determinados por um espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (SPECTRO XEPOS – AMETEK) com radiação de Molibdênio. Esta análise foi realizada no laboratório de Ciências da Terra da Stanford University - USA. Os porta amostras possuíam 40 mm de diâmetro com o fundo recoberto por um filme de polipropileno de 4 µ. As amostras de solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos foram maceradas e passadas em peneiras de 200 mesh. As relações moleculares Ki e Kr foram posteriormente calculadas. Para a garantia dos resultados dos teores totais obtidos, foram utilizadas as amostras certificadas *San Joaquim Soil* (NIST SRM 2709) e *Montana Soil* (NIST SRM 2710) como padrão de referência. Para verificar a influência das atividades humanas a partir dos teores dos metais pesados avaliados neste estudo utilizou-

se o Fator de Enriquecimento (FE). Os cálculos para tal utilizaram a seguinte fórmula:

$$FE = [(Metal_S/Ti_S) / (Metal_{FGN}/Ti_{FGN})].$$

Onde Metal é a concentração do metal pesado nos Neossolos Flúvicos e sedimentos (S) em relação ao fundo geoquímico natural (FGN) definido para este estudo (Salomons et al, 1984; Dickinson et al., 1996), utilizando o titânio como elemento normalizador (Reimann & Caritat, 2004). Para esta avaliação se considera contribuições naturais ($FE < 2$) e antrópicas ($FE > 2$) de acordo com Sposito (1989).

3.4.3. Dissolução seletiva de óxidos de ferro

A fração argila dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos foram submetidas a 3 extrações sucessivas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio em pH 7,3 (Mehra & Jackson, 1960) para a extração das formas de ferro livre (Fed). Na extração dos óxidos de ferro mal cristalizados (Feo), em uma única extração, foi utilizado o oxalato ácido de amônio (McKeague & Day, 1966). Os teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e MnO_2 foram determinados por espectroscopia de absorção atômica.

3.5. Caracterização Mineralógica

3.5.1. Difractometria de raios-X

A fração argila dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos foram obtidas por sedimentação, após associação da dispersão física e química (Embrapa, 2011). Estas amostras foram submetidas a difratometria de raios-X (DRX) em um difratômetro multifuncional Panalytical X'Pert Pro PW 3040/60, equipado com 1800W, tubo de cobalto ($CoK\alpha$) de 60 kV e um detector X'Celerator. A faixa analisada foi de 4 a 50 $^{\circ}2\theta$ com passo de 0,0008 $^{\circ}2\theta$ s⁻¹ com 40 kV e 40 mA para as argilas natural e desferrificada, foram preparadas em lâminas orientadas. Para a identificação dos minerais do tipo 2:1 das amostras foi realizada a saturação da fração argila natural com $MgCl_2$ 0,5 mol L⁻¹, glicolação (1:1 – glicerol:etanol), KCl 1mol L⁻¹ com efeito do aquecimento nas faixas de 25 °C

(temperatura ambiente), 350 °C e 550 °C . Estas lâminas foram irradiadas na faixa de 4 a 40 °2θ ao passo de 0,0008 °2θ s⁻¹.

3.5.2. Microscopia eletrônica de transmissão (MET)

Para a caracterização morfológica da caulinita, a fração argila dos solos selecionados foram analisadas em um microscópio eletrônico de transmissão (MET) Tecnai G2 F20 X-TWIN, equipado com detector de EDS, com 2,5 Å de resolução ponto-a-ponto e tensão de operação de 200 kV do laboratório de microscopia da Stanford University – USA. Aproximadamente 0,1 g de argila natural foi dispersa em acetona em agitador sônico por 3 min. Adicionou-se parte dessa suspensão em porta amostra apropriado, onde se aguardou a evaporação da acetona. Em sequência a amostra foi analisada no MET.

3.6. Suscetibilidade Magnética

A suscetibilidade magnética volumétrica foi determinada nas frações TFSA, areia, silte e argila dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos utilizando um porta amostra cilíndrico de 10 cm³. As medições foram realizadas utilizando um sistema Bartington MS2 (Bartington Instruments LTD) acoplado ao sensor MS2B. As frequências utilizadas pelo sensor MS2B foram 0,465 kHz (k_{BF} – baixa frequência) e 4,65 kHz (k_{AF} – alta frequência) $\pm$ 1 %. Para o cálculo da suscetibilidade magnética por unidade de massa (χ_{BF}) se considerou a equação da suscetibilidade volumétrica [$\chi_{BF} = (10 \times k_{BF})/m$] e para a percentagem de frequência dependente da suscetibilidade magnética (χ_{FD}) a equação $\chi_{FD}\% = 100 \times [(\chi_{BF} - \chi_{AF}) / \chi_{BF}]$ de acordo com Dearing (1999).

3.7. Radiação síncrotron

3.7.1. X-ray absorption near edge structure spectroscopy (XANES)

Pela X-ray absorption near edge structure spectroscopy (XANES), utilizando a radiação síncrotron, foi analisado o elemento Cr de amostras selecionadas de solos, solo aluviais e sedimentos da bacia do rio Doce. O espectro XANES da camada K do Cr foi coletado pela linha de radiação 11-2 do

Laboratório de Radiação Síncrotron da Stanford University – USA (Figura 7). Esta linha de radiação possui uma faixa de energia de 5000-21000 eV, monocromador Si (220) com resfriador de índio (Ln) e detector de fluorescência de germânio (Ge). A energia da camada K do Cr se encontra na faixa de 5989 eV. As amostras selecionadas foram maceradas e passadas em peneira de 200 mesh. Para se obter melhor qualidade dos espectros da camada K do Cr, estas amostras foram diluídas com nitreto de boro e se produziu uma pastilha de 7 mm de diâmetro com aproximadamente 30 mg. Estas foram colocadas em um porta amostra de alumínio no qual foi afixada com fita kapton. Este porta amostra foi colocado a um ângulo de 45 ° com a radiação incidente e coletado pelo método de fluorescência com o detector Lytle. Os padrões de Cr analisados para o refinamento dos dados foi: $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$ e Cromita (FeCr_2O_4). Os dados foram processados pelo programa ATHENA e refinados pelo Linear Combination Fitting – Manceau Approach (Manceau et al., 2012).

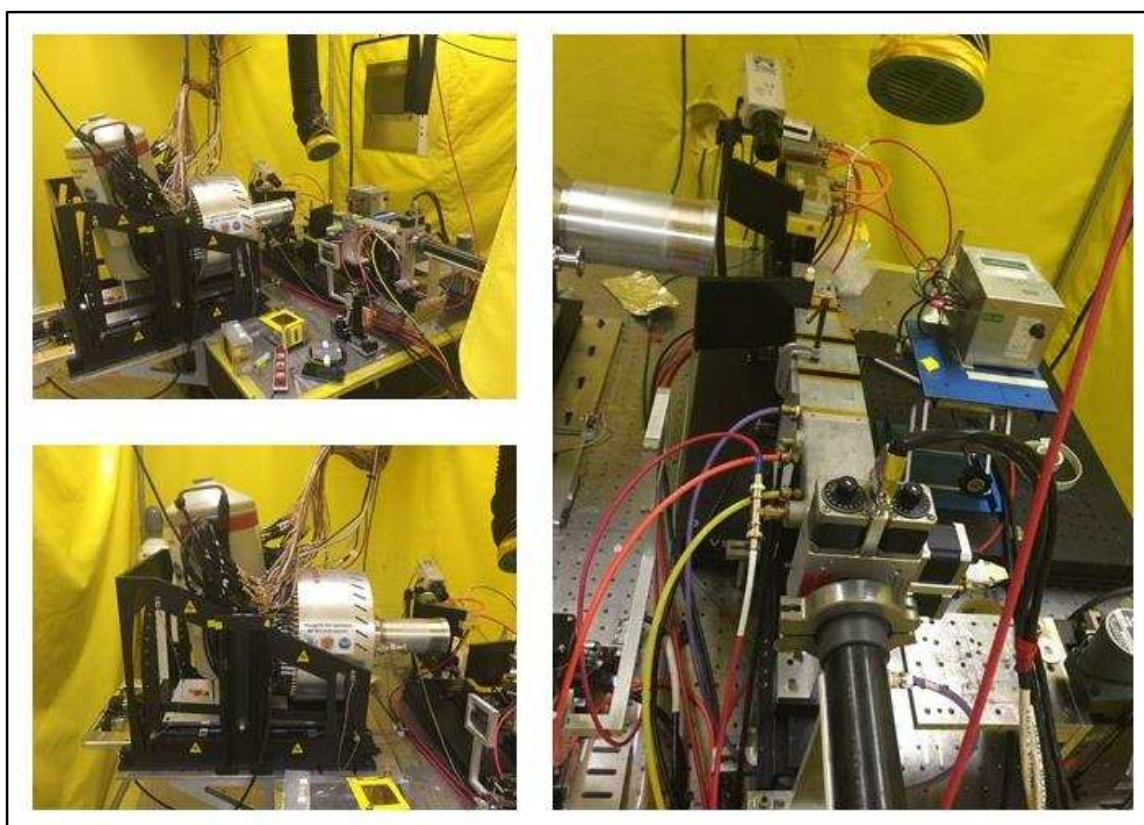


Figura 7. Linha de radiação 11-2 da Stanford Synchrotron Radiation Laboratory – USA.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Atributos morfológicos e físicos

A bacia hidrográfica do rio Doce, por constituir um ambiente de paisagens movimentadas, com solos bastante intemperizados e dissecação pronunciada, se insere no amplo Domínio de Mares de Morros Florestados (Ab'Saber, 1966; Ab'Saber, 1970) com altitudes variando de 60 a 2850 m. Com exceção do delta do rio doce, onde a bacia está inserida na formação Barreiras, formada por sedimentos do período Quaternário, apresentando uma declividade de suave ondulada a plana (Morais et al., 2006; Santos et al., 2006).

Os pontos amostrados de solos e sedimentos ao longo da calha principal do rio Doce está sobre uma litologia formada por ortognaisse, granito, biotita gnaisse e depósitos aluviais (cascalho, areia, silte e argila) (CPRM, 2005; CPRM, 2013). Estas informações podem ser observadas no Quadro 2, onde consta a geologia para cada local de coleta e seus agrupamentos em "Área". Estes materiais influenciados pelas oscilações climáticas formam espessos mantos de intemperismo, permitindo o desenvolvimento de solos profundos, como os coletados para o presente trabalho, com exceção aos Cambissolos (P6 e P11). Estes foram classificados pelo SiBCS (2013) como Latossolo Vermelho Distrófico típico (P1); Latossolo Amarelo Distrófico típico (P2); Argissolo Vermelho Eutrófico típico (P3); Argissolo Vermelho Eutrófico típico (P4); Latossolo Amarelo Distrófico típico (P5); Argissolo Vermelho Eutrófico típico (P6); Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (P7); Argissolo Vermelho Distrófico típico (P8); Latossolo Amarelo Distrófico típico (P9); Latossolo Amarelo Distrófico típico (P10); Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico (P11).

As texturas dos solos da parte alta da paisagem variaram de muito argilosa a franco argilo-arenosa (Quadro 3) com teores de argila de 190 a 750 g kg⁻¹. Os solos, de acordo com Munsell (2009), possuem cores desde muito amarelados a muito avermelhados, com matiz variando de 10R a 10YR. Estes possuem valores da relação silte/argila inferiores a 0,50 (Camargo et al., 1987), com exceção dos Cambissolos (Quadro 3). Foram observados valores para esta relação de 0,03 a 0,47 para Latossolos e Argissolos e de 0,43 a 0,70 para Cambissolos (Quadro 3). Com esses resultados evidencia-se o forte grau de intemperismo sofrido por estes materiais (Resende et al., 2007).

Para os Neossolos Flúvicos e sedimentos a relação silte/argila (Quadro 4) se apresentou com valores superiores a 0,50 chegando à 1,39. Marques et al. (2007) encontrou valores semelhantes para Neossolos Flúvicos da ilha de Fernando de Noronha.

Quadro 2. Geologia das áreas de coleta

Área	Localização	Pontos	Geologia ^{1/}			
			Éon	Era	Formação	Material de Origem
1	Rio Doce (MG)	P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico	Proterozóico	Paleo-Proterozóico	Compl. Piedade - Pppi	ortognaisse, granito-granodiorito
		P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico				
		S1 - Sedimento - Foz do Rio Piranga	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
		S2 - Sedimento - Foz do Rio Carmo				
		S3 - Sedimento - Nascente do Rio Doce				
2	Foz do Rio Casca (MG)	P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
		S4 - Sedimento - Foz do Rio Casca				
3	Ipatinga (MG)	P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico	Proterozóico	Paleo-Proterozóico	Compl. Piedade - Pppi	ortognaisse; granito-granodiorito
		P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico				
		P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
		S5 - Sedimento - Ipatinga (MG)				
4	Naque / Periquito (MG)	P4 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico	Proterozóico	Paleo-Proterozóico	Compl. Piedade - Pppi	ortognaisse, granito-granodiorito
		P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico				
		P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
		S6 - Sedimento - Foz do Rio Santo Antonio				
5	Governador Valadares (MG)	P5 -Latossolo Amarelo Distrófico típico	Proterozóico	Neo-Proterozóico	Grupo Rio Doce – NPrd	granitóide
		S7 - Sedimento - Governador Valadares (MG)	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila

^{1/}CPRM – 2005; 2013

Quadro 2. Continuação ...

Área	Localização	Pontos	Geologia ^{1/}			
			Éon	Era	Formação	Material de Origem
6	Tumiritinga (MG)	P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico	Proterozóico	Neo-Proterozóico	Grupo Rio Doce – NPrd	granitóide
			Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
		P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico	Proterozóico	Neo-Proterozóico	Form. Tumiritinga - NPdt	paragnaisse, mármore
7	Resplendor (MG)	P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	Proterozóico	Neo-Proterozóico	Grupo Rio Doce – NPrd	granitóide
		P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
		S8 - Sedimento - Resplendor (MG)				
8	Baixo Guandu (ES)	P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico	Proterozóico	Neo-Proterozóico	Gr. Rio Doce – NPrd	granitóide
				NPps	paragnaisse, xisto e quartzito	
		P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico S9 - Sedimento - Baixo Guandu (ES)	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
9	Colatina (ES)	P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico	Proterozóico	Neo-Proterozóico	Comp. N. Venécia - NPnv	granitóide
		P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico				
		P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico S10 - Sedimento - Colatina (ES)	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
10	Linhares (ES)	P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Formação Barreira - Cgb	cascalho, areia, silte e argila
		P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico			Depósito aluvial –CQa	
		S11 - Sedimento - Linhares (ES)				
11	Regência (ES)	P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico	Fanerozóico	Cenozóico / Quaternário	Depósito aluvial –CQa	cascalho, areia, silte e argila
		S12 - Sedimento - Regência (ES)				

^{1/}CPRM – 2005; 2013

Quadro 3. Caracterização física dos solos da parte alta da paisagem

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)	
											Seca	Úmida
				----- g kg ⁻¹ -----					dag kg ⁻¹	kg dm ⁻³		
P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico												
A	0 - 20	420	120	120	340	0,35	3,50	6	2,67	FAAR	2,5 YR 4/8	2,5 YR 4/6
Bw	80 - 100	340	250	160	250	0,64	1,36	5	2,70	FAAR	2,5 YR 5/8	2,5 YR 4/8
P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico												
A	0 - 20	70	80	220	630	0,35	0,88	14	2,53	MA	10 YR 6/4	10 YR 5/4
Bw	80 - 100	10	50	300	640	0,47	0,20	1	2,49	MA	10 YR 7/8	10 YR 6/8
P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico												
A	0 - 20	120	140	240	500	0,37	0,86	14	2,59	A	2,5 YR 3/5	2,5 YR 2,5/4
Bt	70 - 90	60	80	110	750	0,15	0,75	1	2,50	MA	10 R 3/5	10 R 3/4
P4 - Argissolo Vermelho Distrófico típico												
A	0 - 20	270	110	150	470	0,32	2,45	14	2,53	A	2,5 YR 5/4	2,5 YR 4/4
Bt	80 - 100	230	100	130	540	0,24	2,30	1	2,56	A	10 R 5/6	10 R 4/6
P5 -Latossolo Amarelo Distrófico típico												
A	0 - 20	260	150	80	510	0,16	1,73	8	2,61	A	7,5 YR 4/3	7,5 YR 3/2
Bw	80 - 100	240	140	20	600	0,03	1,71	1	2,65	MA	7,5 YR 5/6	7,5 YR 4/6
P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico												
A	0 - 20	280	60	200	460	0,43	4,67	16	2,60	A	2,5 YR 4/8	2,5 YR 3/4
Bt	80 - 100	160	30	200	610	0,33	5,33	13	2,55	MA	10 R 4/8	10 R 4/6

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; MA - Muito-Argilosa; AAR - Argilo-Arenosa; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila.

Quadro 3. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)	
											Seca	Úmida
		----- g kg ⁻¹ -----						dag kg ⁻¹	kg dm ⁻³			
P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico												
A	0 - 20	430	230	150	190	0,79	1,87	4	2,69	FAR	5YR 5/4	5 YR 4/4
Bi	30 - 50	300	170	160	370	0,43	1,76	10	2,63	AAR	5 YR 5/4	5 YR 4/6
P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico												
A	0 - 20	480	140	50	330	0,15	3,43	6	2,66	FAAR	2,5 YR 4/8	2,5 YR 4/6
Bt	80 - 100	290	110	60	540	0,11	2,64	1	2,62	A	10 R 4/8	10 R 4/6
P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico												
A	0 - 20	490	110	0	400	0,00	4,45	7	2,62	AAR	10 YR 5/4	10 YR 4/4
Bw	80 - 100	220	100	50	630	0,08	2,20	1	2,60	MA	10 YR 6/6	10 YR 5/6
P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico												
A	0 - 20	400	110	20	470	0,04	3,64	5	2,61	AAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4
Bw	80 - 100	220	80	30	670	0,04	2,75	1	2,53	MA	10 YR 6/6	10 YR 5/6
P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico												
A	0 - 20	40	40	260	660	0,39	1,00	19	2,58	MA	10 YR 6/4	10 YR 5/4
Bi	80 - 100	10	100	320	570	0,56	0,10	2	2,50	A	10 YR 6/6	10 YR 5/6

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula.
Textura: FAR - Franco-Arenosa; MA - Muito-Argilosa; AAR - Argilo-Arenosa; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila.

Quadro 4. Caracterização física dos Neossolos Flúvicos

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)		
											Seca	Úmida	
----- g kg ⁻¹ -----				dag kg ⁻¹		kg dm ⁻³							
P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico													
A	0 - 10	130	640	130	100	1,30	0,20	2	2,69	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C1	10 - 20	70	690	120	120	1,00	0,10	1	2,77	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C2	20 - 33	80	550	190	180	1,06	0,15	3	2,67	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C3	33 - 40	70	560	190	180	1,06	0,13	3	2,78	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C4	40 - 55	60	650	180	110	1,64	0,09	1	2,76	FAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	
C5	55 - 65	110	680	120	90	1,33	0,16	2	2,85	FAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	
C6	65 - 90	50	790	40	120	0,33	0,06	2	2,66	ARF	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	
C7	90 - 120	30	480	280	210	1,33	0,06	3	2,73	F	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C8	120 - 180+	40	550	240	170	1,41	0,07	3	2,75	FAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	
P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico													
A	0 - 10	280	640	30	50	0,60	0,44	1	2,84	AR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C1	4 - 20	170	590	110	130	0,85	0,29	2	2,72	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C2	10 - 70	350	580	20	50	0,40	0,60	1	2,84	AR	7,5 YR 7/4	7,5 YR 5/4	
C3	70 - 84	40	600	190	170	1,12	0,07	3	2,75	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C4	71 - 95	130	650	100	120	0,83	0,20	1	2,6	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C5	81 - 112	50	410	280	260	1,08	0,12	5	2,71	F	7,5 YR 5/6	7,5 YR 4/6	
C6	102 - 122	130	680	100	90	1,11	0,19	1	2,73	ARF	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C7	109 - 133	30	480	270	220	1,23	0,06	4	2,47	FAAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C8	118 - 141	90	780	50	80	0,63	0,12	2	2,8	ARF	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C9	132 - 141+	90	570	180	160	1,13	0,16	3	2,81	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; AR - Areia; ARF - Areia-Franca; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; FA - Franco-Argilosa; AS - Argila-Siltosa; F - Franca; FAS - Franco-Argilo-Siltosa.

Quadro 4. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)	
											Seca	Úmida
				----- g kg ⁻¹ -----				dag kg ⁻¹		kg dm ⁻³		
P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico												
A	0 - 4	10	240	360	390	0,92	0,04	8	2,4	FA	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6
C1	4 - 24	10	560	250	180	1,39	0,02	3	2,4	FAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4
C2	24 - 36	40	40	390	530	0,74	1,00	14	2,56	A	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
C3	36 - 80	40	300	360	300	1,20	0,13	5	2,86	FA	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
C4	80 - 110	880	90	0	30	0,00	9,78	1	2,66	AR	7,5 YR 7/6	7,5 YR 6/6
Cg	110 - 120	110	370	280	240	1,17	0,30	5	2,79	F	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico												
A	0 -10	120	690	80	110	0,73	0,17	2	2,47	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
C1	10 - 45	290	630	20	60	0,33	0,46	1	2,48	AR	7,5 YR 7/4	7,5 YR 5/4
C2	45 - 87	20	530	210	240	0,88	0,04	5	2,32	FAAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
C3	87 - 105	310	610	30	50	0,60	0,51	1	2,43	AR	7,5 YR 7/3	7,5 YR 5/3
C4	105 - 120	50	320	270	360	0,75	0,16	9	2,33	FA	7,5 YR 6/6	7,5 YR 4/6
C5	120 - 130	90	670	100	140	0,71	0,13	3	2,43	FAR	7,5 YR 7/4	7,5 YR 5/4
C6	130 - 140	350	570	30	50	0,60	0,61	1	2,35	A	7,5 YR 7/4	7,5 YR 5/4
C7	140 - 170	40	600	140	220	0,64	0,07	4	2,4	FAAR	7,5 YR 7/6	7,5 YR 5/6

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; AR - Areia; ARF - Areia-Franca; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; FA - Franco-Argilosa; AS - Argila-Siltosa; F - Franca; FAS - Franco-Argilo-Siltosa.

Quadro 4. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)		
											Seca	Úmida	
----- g kg ⁻¹ -----				dag kg ⁻¹		kg dm ⁻³							
P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico													
A	0 - 8	170	640	90	100	0,90	0,27	3	2,52	ARF	7,5 YR 7/4	7,5 YR 5/4	
C1	8 - 28	180	580	90	150	0,60	0,31	3	2,43	FAR	7,5 YR 7/4	7,5 YR 5/4	
C2	28 - 59	190	580	100	130	0,77	0,33	3	2,5	FAR	7,5 YR 7/6	7,5 YR 6/6	
C3	59 - 70	420	500	20	60	0,33	0,84	2	2,4	AR	7,5 YR 7/4	7,5 YR 5/4	
C4	70 - 105	480	320	80	120	0,67	1,50	2	2,36	FAR	7,5 YR 7/6	7,5 YR 5/6	
C5	105 - 130	620	200	80	100	0,80	3,10	3	2,34	ARF	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/6	
C6	130 - 160+	140	50	380	430	0,88	2,80	14	2,41	A	7,5 YR 6/6	7,5 YR 4/6	
P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico													
A	0 - 18	80	640	130	150	0,87	0,13	2	2,64	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C1	18 - 22	0	280	350	370	0,95	0,00	7	2,41	FA	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C2	22 - 40	30	520	250	200	1,25	0,06	3	2,68	FAR	7,5 YR 5/6	7,5 YR 4/6	
C3	40 - 61	10	680	150	160	0,94	0,01	5	2,6	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C4	61 - 85	0	450	310	240	1,29	0,00	5	2,52	F	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	
C5	85 - 108	10	730	130	130	1,00	0,01	2	2,67	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C6	108 - 117	0	140	440	420	1,05	0,00	6	2,53	AS	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C7	117 - 135	0	160	480	360	1,33	0,00	9	2,48	FAS	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; AR - Areia; ARF - Areia-Franca; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; FA - Franco-Argilosa; AS - Argila-Siltosa; F - Franca; FAS - Franco-Argilo-Siltosa.

Quadro 4. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)		
											Seca	Úmida	
----- g kg ⁻¹ -----													
dag kg ⁻¹													
kg dm ⁻³													
P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico													
A	0 - 15	400	320	120	160	0,75	1,25	3	2,53	FAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	
AC	15 - 20	160	550	110	180	0,61	0,29	3	2,49	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C1	20 - 30	80	550	160	210	0,76	0,15	4	2,76	FAAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	
C2	30 - 57	140	570	140	150	0,93	0,25	4	2,77	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C3	57 - 74	150	570	100	180	0,56	0,26	7	2,76	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C4	74 - 120+	140	650	90	120	0,75	0,22	7	2,65	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico													
A	0 -10	480	270	90	160	0,56	1,78	3	2,65	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C1	10 - 22	10	230	310	450	0,69	0,04	9	2,41	A	7,5 YR 6/6	7,5 YR 4/6	
C2	22 - 35	50	570	160	220	0,73	0,09	4	2,58	FAAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C3	35 - 50	90	700	80	130	0,62	0,13	2	2,69	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C4	50 - 70	70	510	180	240	0,75	0,14	5	2,56	FAAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4	
C5	70 - 85	40	620	140	200	0,70	0,06	4	2,66	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	
C6	85 - 135	30	270	330	370	0,89	0,11	8	2,45	FA	7,5 YR 5/6	7,5 YR 4/6	
C7	135 - 145+	260	390	160	190	0,84	0,67	5	2,56	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6	

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; AR - Areia; ARF - Areia-Franca; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; FA - Franco-Argilosa; AS - Argila-Siltosa; F - Franca; FAS - Franco-Argilo-Siltosa.

Quadro 4. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)	
											Seca	Úmida
----- g kg ⁻¹ -----						dag kg ⁻¹		kg dm ⁻³				
P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico												
A	0 - 5	110	570	160	160	1,00	0,19	2	2,76	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 4/4
C1	5 - 40	210	240	250	300	0,83	0,88	6	2,76	FA	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4
C2	40 - 60	20	420	330	230	1,43	0,05	5	2,65	F	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
C3	60 - 75	190	240	300	270	1,11	0,79	7	2,73	FA	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6
C4	75 - 103	100	280	310	310	1,00	0,36	10	2,75	FA	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6
C5	103 - 150+	60	20	580	340	1,71	3,00	11	2,73	FAS	7,5 YR 6/6	7,5 YR 5/6
P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico												
A	0 - 13	170	590	90	150	0,60	0,29	1	2,71	FAR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 4/4
C1	13 - 20	230	470	120	180	0,67	0,49	2	2,75	FAR	7,5 YR 5/3	7,5 YR 4/3
C2	20 - 28	260	660	30	50	0,60	0,39	1	2,73	AR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 4/4
C3	28 - 37	200	680	50	70	0,71	0,29	1	2,77	ARF	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
C4	37 - 55	30	450	240	280	0,86	0,07	6	2,74	FAAR	7,5 YR 5,5/4	7,5 YR 4,5/4
C5	55 - 75	30	670	150	150	1,00	0,04	5	2,77	FAR	7,5 YR 5/4	7,5 YR 4/4
C6	75 - 105	30	510	230	230	1,00	0,06	4	2,77	FAAR	7,5 YR 5/6	7,5 YR 4/6
C7	105 - 150	10	130	280	580	0,48	0,08	2	2,72	A	7,5 YR 6/8	7,5 YR 5/8
C8	150 - 175+	0	340	300	360	0,83	0,00	4	2,65	FA	10 YR 6/8	10 YR 5/8

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; AR - Areia; ARF - Areia-Franca; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; FA - Franco-Argilosa; AS - Argila-Siltosa; F - Franca; FAS - Franco-Argilo-Siltosa.

Quadro 4. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura	Cor (Munsell)	
											Seca	Úmida
----- g kg ⁻¹ -----						dag kg ⁻¹		kg dm ⁻³				
P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico												
A	0 -25	290	600	40	70	0,57	0,48	1	2,83	AR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 5/4
C1	25 - 33	320	600	0	80	0,00	0,53	1	2,9	AR	7,5 YR 6,5/4	7,5 YR 5,5/4
C2	33 - 52	20	260	280	440	0,64	0,08	9	2,87	AR	7,5 YR 6/4	7,5 YR 4/4
C3	52 - 63	100	680	100	120	0,83	0,15	3	2,87	FAR	7,5 YR 6/6	7,5 YR 4/6
C4	63 - 130	0	40	420	540	0,78	0,00	13	2,81	AS	7,5 YR 6/6	7,5 YR 4/6
C5	130 - 140+	360	510	40	90	0,44	0,71	1	2,84	ARF	7,5 YR 7/6	7,5 YR 5/6

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; AR - Areia; ARF - Areia-Franca; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; FA - Franco-Argilosa; AS – Argila-Siltosa; F – Franca; FAS – Franco-Argilo-Siltosa.

Uma vez que a bacia do rio Doce possui um relevo muito movimentado, sua suscetibilidade a erosão se caracteriza desde média, com produção de sedimento na taxa de 50 t/km²/ano no ponto inicial de coleta (encontro dos rios Piranga e Carmo), até forte/muito forte com 100-200 t/km²/ano de sedimento a partir da região de Governador Valadares até sua foz no Estado do Espírito Santo (PIRH, 2010). Assim, as planícies fluviais formadas são amplas e os terraços, em sua maioria, constituídos por material arenoso e argilo-arenosos, com cerca de 3 m de desnível. Eventualmente, esses terraços são inundados durante cheias excepcionais. Devido à esses processos, foi possível a coleta de Neossolos Flúvicos ao longo da calha principal do rio, solos estes que podem ser utilizados como chave na interpretação da história geológica de uma região (Suguio & Bigarella, 1990), uma vez que recebem deposição constante de material sedimentar.

Os Neossolos Flúvicos foram assim classificados (Quadro 4), Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico (P12 e P13); Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico (P14 e P15); Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico (P16, P17, P18, P19, P20, P21) e Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico (P22). Todos os Neossolos Flúvicos estudados apresentaram texturas variadas em seus horizontes (Quadro 4). Essa variação de textura foi de areia à argila, com teores de 60 a 450 g kg⁻¹ de argila, sendo no geral franco-argilo-arenosa, sendo estes valores semelhantes aos encontrados por Nunes et al. (2001). Pelo caráter flúvico destes solos, se observa uma extratificação aleatória de camadas mais argilosas e mais arenosas em profundidade (Figura 8a e 8b). Uma vez que os Neossolos Flúvicos são formados por deposição de sedimentos ao longo dos anos em períodos chuvosos, esta constatação nos indica que também ocorre uma variação da granulometria desses sedimentos carreados e depositados pelo rio. O que chama atenção também são os teores elevados da fração areia fina (0,21- 0,05 mm) em comparação aos da areia grossa (2,0 – 0,21 mm), onde se encontrou teores de areia fina de 780 g kg⁻¹. Uma vez que a área em estudo possui forte grau de intemperismo e relevo movimentado, que favorece a erosão, produzindo assim uma grande quantidade de sedimentos. E de acordo com a litologia da área, justifica os altos teores de areia fina como se pode observar na relação areia grossa/areia fina (Quadro 4 e 5).

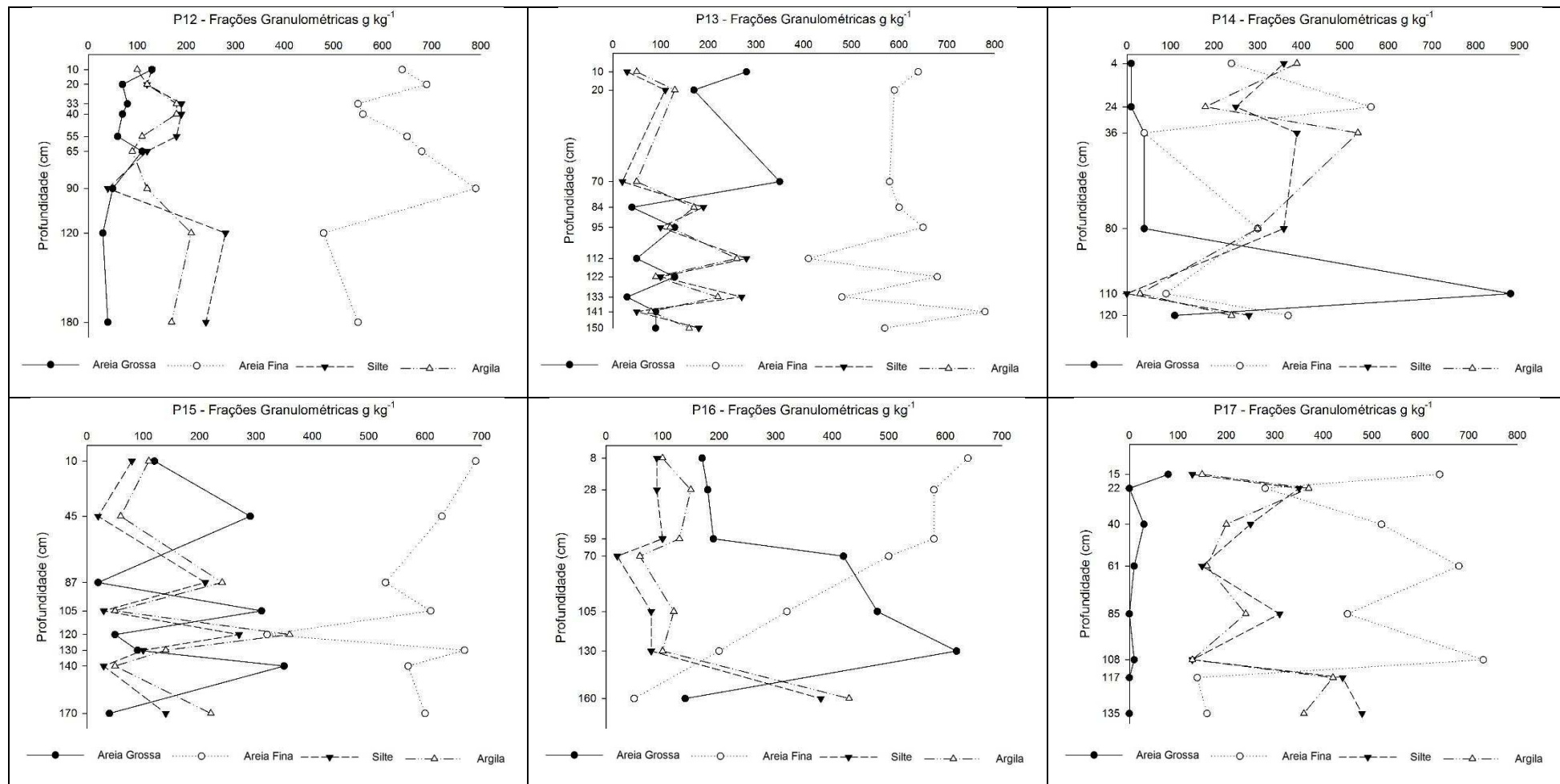


Figura 8a. Teores da fração areia grossa, areia fina, silte e argila em profundidade dos perfis de Neossolos Flúvicos.

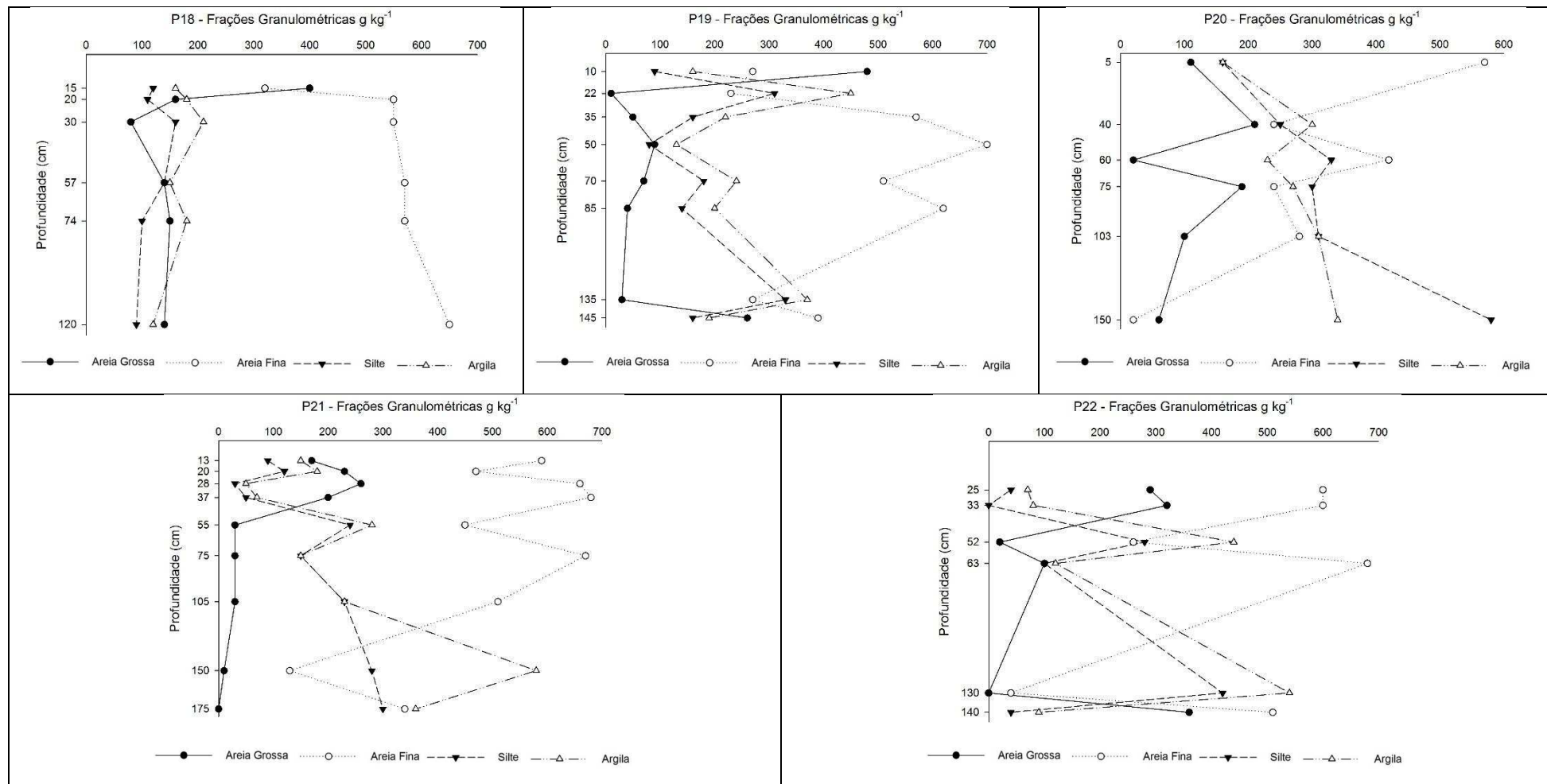


Figura 8b. Teores da fração areia grossa, areia fina, silte e argila em profundidade dos perfis de Neossolos Flúvicos.

Para o estudo dos sedimentos da bacia do rio Doce, foram coletadas amostras na seção transversal do rio em diversos pontos ao longo da calha principal (Quadro 5). Como se pode observar, a distribuição da textura dos sedimentos, através de sua seção transversal é muito variada em concordância com (Suguio, 1973). Sua classificação granulométrica foi de areia-franca a franco-argilosa de uma margem á outra (Quadro 5). Esta variação é em função da velocidade da corrente, da disponibilidade de sedimentos e de sua granulometria (Carvalho, 1994). Considerando que as velocidades são menores perto das margens, observou-se granulometrias menores que foram aumentando para o centro e depois diminuindo na direção da outra margem. Os resultados dos sedimentos coletados do centro, que são formados exclusivamente pela fração areia, não constam neste trabalho.

No perfil vertical dos sedimentos analisados, foi observada uma variação nos teores da fração areia, silte e argila (Quadro 5), que não segue uma ordem crescente ou decrescente dos teores para cada fração em profundidade. Os elevados teores da fração areia fina também são observados nos sedimentos.

Quadro 5. Caracterização física dos sedimentos fluviais das margens esquerda e direita do rio Doce

Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura
----- g Kg ⁻¹ -----							dag kg ⁻¹	kg dm ⁻³	
S1 - Foz do Rio Piranga									
Margem Direita									
0-10	180	690	40	90	0,44	0,26	3	2,44	ARF
10-20	540	400	10	50	0,20	1,35	3	2,66	AR
20-30	290	480	100	130	0,77	0,60	3	2,53	FAR
S2 - Foz do Rio Carmo									
Margem Esquerda									
0-10	610	330	40	20	2	1,85	1	2,85	AR
10-20	560	420	10	10	1,00	1,33	1	2,7	AR
20-30	500	489	5	6	0,83	1,02	1	2,5	AR
S3 - Nascente do Rio Doce									
Margem Esquerda									
0-10	120	750	70	60	1,17	0,16	2	2,44	ARF
10-20	140	410	230	220	1,05	0,34	4	2,41	FAAR
20-30	200	690	40	70	0,57	0,29	1	2,56	AR
Margem Direita									
0-10	160	710	70	60	1,17	0,23	2	2,5	ARF
S4 - Foz do Rio Casca									
Margem Direita (Antes)									
0-10	340	260	200	200	1,00	1,31	3	2,44	FAR
10-20	40	420	270	270	1,00	0,10	4	2,48	FAAR
20-30	20	500	250	230	1,09	0,04	2	2,47	FAAR
S5 - Ipatinga (MG)									
Margem Direita (Antes)									
0-10	10	650	180	160	1,13	0,02	3	2,47	FAR
10-25	0	410	300	290	1,03	0,00	7	2,55	FA
25-40	10	510	210	270	0,78	0,02	8	2,38	FAAR
Margem Esquerda (Depois)									
0-13	80	300	320	300	1,07	0,27	5	2,44	FA
13-27	520	410	50	20	2,5	1,27	1	2,83	AR
Margem Direita (Depois)									
0-15	240	480	140	140	1,00	0,50	2	2,47	FAR
15-30	100	500	220	180	1,22	0,20	3	2,47	FAR
30-45	200	340	230	230	1,00	0,59	4	2,46	FAAR

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A – Argila; ARF – Areia-Franca; AR – Areia; FA – Franco-Argilosa; F - Franca.

Continua...

Quadro 5. Continuação ...

Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura
----- g Kg ⁻¹ -----						dag kg ⁻¹	kg dm ⁻³		
S6 - Naque (MG) - Foz Rio Santo Antonio									
Margem Esquerda (Antes)									
0-10	110	760	70	60	1,17	0,14	1	2,63	ARF
10-20	120	720	80	80	1,00	0,17	1	2,47	ARF
20-30	110	740	50	100	0,50	0,15	1	2,41	ARF
Margem Direita (Antes)									
0-12	20	450	250	280	0,89	0,04	3	2,4	FAAR
12-25	20	550	230	200	1,15	0,04	6	2,44	FAR
Margem Esquerda (Depois)									
0-12	270	550	90	90	1,00	0,49	2	2,44	ARF
12-23	440	230	170	160	1,06	1,91	2	2,76	FAR
23-35	460	440	50	50	1,00	1,05	1	2,63	AR
Margem Direita (Depois)									
0-10	180	740	50	30	1,67	0,24	1	2,63	AR
10-20	70	700	130	100	1,30	0,10	2	2,5	FAR
S7 - Governador Valadares (MG)									
Margem Esquerda (Antes)									
0-10	330	610	30	30	1,00	0,54	1	2,59	AR
10-20	400	540	30	30	1,00	0,74	1	2,8	AR
Margem Direita (Antes)									
0-15	10	440	290	260	1,12	0,02	5	2,41	F
15-30	10	460	310	220	1,41	0,02	4	2,78	F
30-45	10	410	320	260	1,23	0,02	4	2,5	F
Margem Esquerda (Depois)									
0-12	380	560	30	30	1,00	0,68	1	2,6	AR
12-24	550	430	0	20	0,00	1,28	2	2,56	AR
24-36	620	350	0	30	0	1,77	1	2,82	AR
Margem Direita (Depois)									
0-10	350	210	140	300	0,47	1,67	9	2,44	FAAR
10-20	380	200	140	280	0,50	1,90	9	2,47	FAAR
20-30	600	120	70	210	0,33	5,00	9	2,53	FAAR

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A – Argila; ARF – Areia-Franca; AR – Areia; FA – Franco-Argilosa; F - Franca.

Continua...

Quadro 5. Continuação...

Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura
----- g Kg ⁻¹ -----							dag kg ⁻¹	kg dm ⁻³	
S8 - Resplendor (MG)									
Margem Esquerda (Antes)									
0-13	140	630	100	130	0,77	0,22	3	2,67	FAR
13-26	60	390	240	310	0,77	0,15	9	2,41	FA
Margem Direita (Antes)									
0-12	410	460	80	50	1,60	0,89	2	2,63	ARF
12-24	150	730	50	70	0,71	0,21	2	2,7	ARF
24-36	130	680	80	110	0,73	0,19	4	2,63	FAR
Margem Esquerda (Depois)									
0-17	290	530	50	130	0,38	0,55	2	2,5	FAR
17-34	250	640	30	80	0,38	0,39	2	2,6	ARF
Margem Direita (Depois)									
0-10	180	300	210	310	0,68	0,60	12	2,56	FAAR
S9 - Baixo Guandu (ES)									
Margem Esquerda (Depois)									
0-11	190	620	120	70	1,71	0,31	2	2,63	ARF
11-24	140	770	40	50	0,80	0,18	1	2,6	AR
24-36	150	780	20	50	0,40	0,19	2	2,47	AR
Margem Direita (Depois)									
0-15	10	900	40	50	0,80	0,01	1	2,63	AR
15-24	10	900	30	60	0,50	0,01	3	2,56	AR
24-35	20	860	50	70	0,71	0,02	2	2,56	ARF
S10 - Colatina (ES)									
Margem Esquerda (Antes)									
0-15	60	690	100	150	0,67	0,09	6	2,7	FAR
15-30	90	780	50	80	0,63	0,12	4	2,67	ARF
Margem Direita (Antes)									
0-15	30	300	200	470	0,43	0,10	10	2,85	A
15-30	280	210	210	300	0,70	1,33	10	2,5	FAAR
Margem Esquerda (Depois)									
0-30	100	450	170	280	0,61	0,22	12	2,41	FAAR
Margem Direita (Depois)									
0-15	920	50	0	30	0,00	18,40	1	2,7	AR
15-30	870	80	20	30	0,67	10,88	1	2,74	AR

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; ARF - Areia-Franca; AR - Areia; FA - Franco-Argilosa; F - Franca.

Continua...

Quadro 5. Continuação ...

Prof. (cm)	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S / A ^{3/}	AG / AF ^{4/}	ADA ^{5/}	DP ^{6/}	Textura
----- g Kg ⁻¹ -----							dag kg ⁻¹	kg dm ⁻³	
S11 - Linhares (ES)									
Margem Esquerda (Antes)									
0-30	680	210	20	90	0,22	3,24	1	2,5	ARF
Margem Direita (Antes)									
0-17	500	440	0	60	0,00	1,14	1	2,7	AR
17-20	190	640	30	140	0,21	0,30	6	2,47	FAR
20-25	660	310	0	30	0,00	2,13	1	2,53	AR
Margem Esquerda (Depois)									
0-14	120	720	30	130	0,23	0,17	3	2,6	ARF
14-33	20	330	230	420	0,55	0,06	9	2,44	A
Margem Direita (Depois)									
0-17	170	540	70	220	0,32	0,31	5	2,56	FAAR
17-28	190	590	60	160	0,38	0,32	6	2,86	FAR
S12 - Regência (ES)									
Margem Esquerda (Depois)									
0-22	80	680	70	170	0,41	0,12	4	2,53	FAR
22-33	860	110	10	20	0,50	7,82	1	2,53	AR
Margem Direita (Depois)									
0-19	340	370	90	200	0,45	0,92	5	2,53	FAR
19-32	280	390	110	220	0,50	0,72	7	2,47	FAAR

^{1/} Areia Grossa; ^{2/} Areia Fina; ^{3/} Relação Silte/Argila; ^{4/} Relação Areia Grossa/Areia Fina; ^{5/} Argila Dispersa em Água; ^{6/} Densidade de Partícula. Textura: FAR - Franco-Arenosa; FAAR - Franco-Argilo-Arenosa; A - Argila; ARF - Areia-Franca; AR - Areia; FA - Franco-Argilosa; F - Franca.

4.2. Atributos químicos

4.2.1. Química dos solos e sedimentos

Ao se analisar os compartimentos coletados da bacia do rio Doce (solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos), pode-se observar reação fortemente ácida a fraca com valores de pH em H₂O variando de 4,24 a 6,54 para solos (P1 a P11); de 5,09 a 6,90 para os Neossolos Flúvicos (P12 a P22) e sedimentos (S1 a S12) (Quadro 6, 7 e 8). Valores semelhantes a estes foram verificados para solos de Minas Gerais (Caires, 2009) e Espírito Santo (Lani et al., 2001; Pacheco, 2011). O ΔpH indicou o predomínio de cargas negativas na superfície dos colóides pelos seus valores negativos (Van Raij & Peech, 1972; Van Raij, 1973; Gillmann, 1984; Fontes et al., 2001), confirmado pelo predomínio de minerais na fração argila com cargas dependentes de pH.

Para os solos (P1 a P11), avaliando a atividade da argila pela CTC corrigida (CTCr), seus valores se apresentaram inferiores a $27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo portanto argila de baixa atividade (Tb). Para os Neossolos Flúvicos esse parâmetro se apresentou com valores superiores a $27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para os perfis P12 a P15, portanto argila de alta atividade (Ta) e inferiores para os perfis P16 a P22 (Quadro 6). Avaliando a distribuição dos Neossolos Flúvicos como Ta e Tb ao longo do rio doce, se observa que a partir da nascente (encontro do rio do Carmo e Piranga) até a proximidade com a região de Ipatinga (MG), estes solos apresentam argila de alta atividade e, desse ponto até a foz do rio Doce, com argila de atividade baixa. Os sedimentos apresentaram, geralmente, como Ta (Quadro 7).

Observando os teores de bases trocáveis juntamente com SB e V %, os solos se apresentam como distróficos (Quadro 6), com exceção do P3 e P6, que se apresentaram como eutróficos, com V % variando de 64,90 a 81,70. Essa diferenciação se deve a sua própria origem litogênica com granitos e ortognaisses, com diferentes graus de intemperismo e lixiviação, que manteve os teores de bases elevados, uma vez que estes solos foram coletados em áreas de preservação permanente com mata secundária. Para os Neossolos Flúvicos se observa uma intercalação em profundidade de seus horizontes em eutróficos e distróficos (Quadro 6). Este fato ocorre devido à sobreposição de camadas de sedimentos aluviais, uma vez que os Neossolos Flúvicos são solos minerais não hidromórficos, oriundos de sedimentos recentes referidos ao período Quaternário. Estes solos apresentam uma variabilidade muito grande em suas características físicas, químicas e morfológicas, devido a diversidade do seu material de origem e o seu baixo grau de desenvolvimento pedogenético (SiBCS, 2013).

Quadro 6. Caracterização química dos solos da parte alta da paisagem

Hor.	Prof. (cm)	pH		ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
		H ₂ O	KCl															
----- cmol _c dm ⁻³ -----														----- % -----		dag dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹
P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico																		
A	0 - 20	5,13	4,36	-0,77	0,12	1,10	0,80	0,29	4,80	2,02	2,31	6,82	20,06	29,60	12,60	1,80	2,00	25,20
Bw	80 - 100	5,40	4,19	-1,21	0,02	0,35	0,36	1,27	2,70	0,73	2,00	3,43	13,72	21,30	63,50	0,30	0,40	17,70
P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico																		
A	0 - 20	5,16	4,34	-0,82	0,14	0,87	1,74	0,39	4,30	2,75	3,14	7,05	11,19	39,00	12,40	2,25	1,70	26,00
Bw	80 - 100	5,17	4,36	-0,81	0,04	0,05	0,47	0,88	2,70	0,56	1,44	3,26	5,09	17,20	61,10	0,45	0,40	9,90
P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico																		
A	0 - 20	5,92	5,10	-0,82	0,28	4,55	2,01	0,00	3,70	6,84	6,84	10,54	19,52	64,90	0,00	2,55	1,10	21,90
Bt	70 - 90	5,95	5,72	-0,23	0,07	3,16	1,19	0,00	1,60	4,42	4,42	6,02	8,03	73,40	0,00	0,45	1,60	9,20
P4 - Argissolo Vermelho Distrófico típico																		
A	0 - 20	4,30	4,03	-0,27	0,05	0,07	0,07	1,56	6,00	0,19	1,75	6,19	13,17	3,10	89,10	1,80	1,20	22,50
Bt	80 - 100	4,71	4,36	-0,35	0,02	0,05	0,01	1,37	2,60	0,08	1,45	2,68	4,96	3,00	94,50	0,45	0,40	21,10
P5 - Latossolo Amarelo Distrófico típico																		
A	0 - 20	4,24	4,03	-0,21	0,08	0,17	0,12	2,05	8,70	0,37	2,42	9,07	17,78	4,10	84,70	2,32	2,20	16,20
Bw	80 - 100	4,75	4,35	-0,40	0,03	0,06	0,01	1,27	4,50	0,10	1,37	4,60	7,67	2,20	92,70	0,97	0,40	9,10
P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico																		
A	0 - 20	6,45	5,67	-0,78	0,12	4,66	2,34	0,00	1,60	7,12	7,12	8,72	18,96	81,70	0,00	2,18	1,30	40,50
Bt	80 - 100	6,54	5,72	-0,82	0,05	3,38	0,95	0,00	1,10	4,38	4,38	5,48	8,98	79,90	0,00	0,67	1,30	28,90

Continua....

Quadro 6. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	pH		ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
		H ₂ O	KCl															
----- cmol _c dm ⁻³ -----																		
----- % -----																		
dag dm ⁻³																		
mg dm ⁻³																		
mg L ⁻¹																		
P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico																		
A	0 - 20	5,77	4,21	-1,56	0,28	0,89	1,33	0,20	3,10	2,50	2,70	5,60	29,47	44,60	7,40	1,35	0,70	36,90
Bi	30 - 50	5,35	4,00	-1,35	0,14	0,60	1,34	0,88	3,50	2,08	2,96	5,58	15,08	37,30	29,70	0,90	0,50	27,40
P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico																		
A	0 - 20	5,64	4,59	-1,05	0,13	2,22	0,56	0,29	3,50	2,91	3,20	6,41	19,42	45,40	9,10	1,80	1,30	39,50
Bt	80 - 100	5,00	4,26	-0,74	0,03	0,20	0,15	0,68	2,10	0,38	1,06	2,48	4,59	15,30	64,20	0,30	0,30	18,90
P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico																		
A	0 - 20	5,08	4,20	-0,88	0,23	0,60	0,60	0,29	3,70	1,43	1,72	5,13	12,83	27,90	16,90	1,35	1,40	37,70
Bw	80 - 100	4,69	4,23	-0,46	0,06	0,07	0,08	0,98	3,10	0,21	1,19	3,31	5,25	6,30	82,40	0,30	0,60	21,50
P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico																		
A	0 - 20	5,14	4,05	-1,09	0,14	0,66	0,36	1,17	6,80	1,16	2,33	7,96	16,94	14,60	50,20	2,25	2,80	18,60
Bw	80 - 100	4,73	4,11	-0,62	0,03	0,22	0,23	1,37	3,70	0,48	1,85	4,18	6,24	11,50	74,10	0,52	0,40	16,60
P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico																		
A	0 - 20	5,21	4,10	-1,11	0,17	1,68	2,01	0,49	4,80	3,86	4,35	8,66	13,12	44,60	11,30	2,25	1,90	24,90
Bi	80 - 100	5,61	4,47	-1,14	0,04	0,16	2,06	0,59	1,80	2,26	2,85	4,06	7,12	55,70	20,70	0,45	1,80	11,60

^{1/}SB = Soma de bases. ^{2/}t = Capacidade de troca catiônica efetiva. ^{3/}T = Capacidade de troca catiônica a pH 7,0. ^{4/}CTCr = Atividade da fração argila. ^{5/}V = Saturação por bases. ^{6/}m = Saturação por alumínio trocável. ^{7/}CO = Carbono Orgânico do solo. ^{8/}P rem = Fósforo remanescente.

Quadro 7. Caracterização química dos Neossolos Flúvicos

Hor.	Prof. (cm)	pH		ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
		H ₂ O	KCl															
----- cmol _c dm ⁻³ -----														----- % -----		dag dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹
P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico																		
A	0 - 10	5,96	5,27	-0,69	0,04	3,14	0,74	0,00	1,10	3,92	3,92	5,02	50,20	78,10	0,00	0,88	3,80	28,60
C1	10 - 20	5,87	5,28	-0,59	0,05	1,81	0,47	0,00	1,90	2,33	2,33	4,23	35,25	55,10	0,00	0,66	5,60	40,00
C2	20 - 33	5,96	5,24	-0,72	0,04	0,85	0,16	0,00	1,90	1,05	1,05	2,95	16,39	35,60	0,00	0,88	3,60	47,20
C3	33 - 40	5,87	5,26	-0,61	0,04	2,42	0,50	0,00	1,10	2,96	2,96	4,06	22,56	72,90	0,00	0,88	4,30	33,10
C4	40 - 55	6,10	5,40	-0,70	0,12	0,94	0,45	0,00	1,90	1,51	1,51	3,41	31,00	44,30	0,00	0,59	4,10	20,00
C5	55 - 65	6,25	5,56	-0,69	0,02	0,72	0,34	0,00	2,90	1,08	1,08	3,98	44,22	27,10	0,00	0,44	2,90	21,10
C6	65 - 90	6,33	5,67	-0,66	0,02	0,90	0,65	0,00	2,90	1,57	1,57	4,47	37,25	35,10	0,00	0,52	2,30	14,70
C7	90 - 120	5,92	5,32	-0,60	0,02	0,80	0,54	0,00	4,00	1,36	1,36	5,36	25,52	25,40	0,00	0,88	2,80	19,40
C8	120 - 180+	6,07	5,46	-0,61	0,00	0,21	0,00	0,00	3,40	0,21	0,21	3,61	21,24	5,80	0,00	0,52	0,80	45,50
P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico																		
A	0 - 10	6,32	5,73	-0,59	0,13	0,44	0,04	0,00	8,90	0,61	0,61	9,51	190,20	6,40	0,00	0,37	1,10	11,70
C1	4 - 20	5,90	5,13	-0,77	0,36	1,59	0,58	0,00	11,30	2,53	2,53	13,83	106,38	18,30	0,00	0,81	13,70	33,60
C2	10 - 70	5,98	5,18	-0,80	0,29	1,58	0,61	0,00	5,50	2,48	2,48	7,98	159,60	31,10	0,00	0,15	11,20	35,00
C3	70 - 84	5,89	5,02	-0,87	0,40	1,66	0,60	0,00	5,50	2,66	2,66	8,16	48,00	32,60	0,00	0,66	18,30	36,50
C4	71 - 95	5,76	5,08	-0,68	0,32	1,56	0,58	0,00	5,60	2,46	2,46	8,06	67,17	30,50	0,00	0,30	12,50	37,00
C5	81 - 112	5,70	5,02	-0,68	0,06	0,56	0,04	0,00	5,60	0,66	0,66	6,26	24,08	10,50	0,00	0,74	3,90	13,40
C6	102 - 122	5,84	4,96	-0,88	0,06	0,55	0,03	0,00	6,40	0,64	0,64	7,04	78,22	9,10	0,00	0,30	1,90	10,40
C7	109 - 133	5,59	4,88	-0,71	0,14	0,72	0,06	0,00	6,30	0,92	0,92	7,22	32,82	12,70	0,00	0,74	5,90	11,60
C8	118 - 141	5,72	4,79	-0,93	0,06	2,67	0,78	0,00	6,30	3,51	3,51	9,81	122,63	35,80	0,00	0,22	5,90	26,60
C9	132 - 141+	5,77	5,12	-0,65	0,04	1,22	0,27	0,00	1,60	1,53	1,53	3,13	19,56	48,90	0,00	0,44	4,50	44,80

Continua...

Quadro 7. Continuação

Hor.	Prof. (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
----- cmol _c dm ⁻³ -----														----- % -----		dag dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹
P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico																		
A	0 - 4	5,24	4,78	-0,46	0,03	1,86	0,26	0,00	1,90	2,15	2,15	4,05	10,38	53,10	0,00	1,03	2,90	38,30
C1	4 - 24	5,52	4,68	-0,84	0,03	1,42	0,30	0,00	1,60	1,75	1,75	3,35	18,61	52,20	0,00	0,44	3,00	40,40
C2	24 - 36	5,29	4,67	-0,62	0,02	1,36	0,36	0,00	1,10	1,74	1,74	2,84	5,36	61,30	0,00	1,40	1,90	33,90
C3	36 - 80	5,28	4,52	-0,76	0,03	1,88	0,62	0,00	1,60	2,53	2,53	4,13	13,77	61,30	0,00	0,88	1,10	26,10
C4	80 - 110	5,73	5,52	-0,21	0,02	1,19	0,58	0,00	2,40	1,79	1,79	4,19	139,67	42,70	0,00	0,15	1,40	27,20
Cg	110 - 120	5,64	4,99	-0,65	0,37	4,99	0,70	0,00	2,30	6,06	6,06	8,36	34,83	72,50	0,00	1,03	1,50	14,60
P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico																		
A	0 - 10	6,38	5,84	-0,54	0,13	1,42	0,45	0,00	4,50	2,00	2,00	6,50	59,09	30,80	0,00	0,44	5,10	42,30
C1	10 - 45	5,97	5,31	-0,66	0,09	1,28	0,29	0,00	0,80	1,66	1,66	2,46	41,00	67,50	0,00	0,22	5,80	40,60
C2	45 - 87	6,20	5,73	-0,47	0,02	1,24	0,39	0,00	1,00	1,65	1,65	2,65	11,04	62,30	0,00	1,18	8,80	46,30
C3	87 - 105	6,15	5,37	-0,78	0,03	1,55	0,46	0,00	1,10	2,04	2,04	3,14	62,80	65,00	0,00	0,44	4,20	32,50
C4	105 - 120	6,16	5,55	-0,61	0,11	1,56	0,46	0,00	1,90	2,13	2,13	4,03	11,19	52,90	0,00	1,40	6,40	37,60
C5	120 - 130	6,20	5,40	-0,80	0,09	1,67	0,34	0,00	1,90	2,10	2,10	4,00	28,57	52,50	0,00	0,52	4,50	36,60
C6	130 - 140	6,10	5,39	-0,71	0,06	2,31	0,68	0,00	1,80	3,05	3,05	4,85	97,00	62,90	0,00	0,22	5,20	31,30
C7	140 - 170	6,09	5,38	-0,71	0,04	2,15	0,40	0,00	1,80	2,59	2,59	4,39	19,95	59,00	0,00	0,66	4,10	35,20

Continua...

Quadro 7. Continuação

Hor.	Prof. (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
----- cmol _c dm ⁻³ -----														----- % -----		dag dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹
P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																		
A	0 - 8	5,98	5,29	-0,69	0,17	1,15	0,28	0,00	2,60	1,60	1,60	4,20	42,00	38,10	0,00	0,52	5,10	39,20
C1	8 - 28	5,65	4,84	-0,81	0,07	1,02	0,38	0,00	1,40	1,47	1,47	2,87	19,13	51,20	0,00	0,44	2,90	36,40
C2	28 - 59	5,70	4,96	-0,74	0,04	1,08	0,29	0,00	1,60	1,41	1,41	3,01	23,15	46,80	0,00	0,44	2,70	36,90
C3	59 - 70	5,76	4,86	-0,90	0,03	0,84	0,11	0,00	1,60	0,98	0,98	2,58	43,00	38,00	0,00	0,22	2,20	45,30
C4	70 - 105	6,15	5,13	-1,02	0,04	0,95	0,22	0,00	1,10	1,21	1,21	2,31	19,25	52,40	0,00	0,30	4,00	41,40
C5	105 - 130	6,09	5,30	-0,79	0,05	0,91	0,34	0,00	1,00	1,30	1,30	2,30	23,00	56,50	0,00	0,30	3,00	45,30
C6	130 - 160+	5,09	4,48	-0,61	0,03	1,40	0,39	0,29	0,80	1,82	2,11	2,62	6,09	69,50	13,70	1,03	1,50	24,10
P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																		
A	0 - 18	6,65	5,76	-0,89	0,13	2,46	0,96	0,00	0,60	3,55	3,55	4,15	27,67	85,50	0,00	0,74	5,30	29,20
C1	18 - 22	6,15	5,19	-0,96	0,15	3,88	1,75	0,00	1,40	5,78	5,78	7,18	19,41	80,50	0,00	1,69	7,10	28,90
C2	22 - 40	6,30	5,24	-1,06	0,08	2,79	0,85	0,00	2,40	3,72	3,72	6,12	30,60	60,80	0,00	1,03	4,10	33,10
C3	40 - 61	6,53	5,36	-1,17	0,06	2,54	0,68	0,00	1,90	3,28	3,28	5,18	32,38	63,30	0,00	0,59	3,50	37,30
C4	61 - 85	6,17	5,20	-0,97	0,07	2,80	1,16	0,00	1,40	4,03	4,03	5,43	22,63	74,20	0,00	0,81	3,70	30,00
C5	85 - 108	6,39	5,27	-1,12	0,05	1,78	0,58	0,00	1,90	2,41	2,41	4,31	33,15	55,90	0,00	0,52	5,80	39,20
C6	108 - 117	5,76	4,67	-1,09	0,08	3,85	1,68	0,10	1,40	5,61	5,71	7,01	16,69	80,00	1,80	1,03	2,10	28,10
C7	117 - 135	5,79	5,07	-0,72	0,04	2,22	0,77	0,00	2,90	3,03	3,03	5,93	16,47	51,10	0,00	0,88	2,40	22,70

Continua...

Quadro 7. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
----- cmol _c dm ⁻³ -----														----- % -----		dag dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹
P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																		
A	0 - 15	6,09	5,18	-0,91	0,10	1,94	0,82	0,00	1,90	2,86	2,86	4,76	29,75	60,10	0,00	0,88	4,70	39,40
AC	15 - 20	6,20	5,36	-0,84	0,08	1,86	0,77	0,00	1,60	2,71	2,71	4,31	23,94	62,90	0,00	0,66	1,60	36,30
C1	20 - 30	6,15	5,22	-0,93	0,06	2,18	0,76	0,00	2,10	3,00	3,00	5,10	24,29	58,80	0,00	0,81	0,60	30,00
C2	30 - 57	6,45	5,26	-1,19	0,04	1,63	0,63	0,00	2,30	2,30	2,30	4,60	30,67	50,00	0,00	0,44	0,40	33,00
C3	57 - 74	6,47	5,26	-1,21	0,03	1,85	0,62	0,00	1,40	2,50	2,50	3,90	21,67	64,10	0,00	0,44	0,30	33,00
C4	74 - 120+	6,60	5,60	-1,00	0,04	1,31	0,54	0,00	1,00	1,89	1,89	2,89	24,08	65,40	0,00	0,22	0,90	29,30
P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																		
A	0 - 10	5,99	5,40	-0,59	0,23	1,68	0,63	0,00	1,80	2,54	2,54	4,34	27,13	58,50	0,00	0,75	6,20	42,30
C1	10 - 22	6,36	5,75	-0,61	0,26	3,51	1,10	0,00	2,30	4,87	4,87	7,17	15,93	67,90	0,00	1,57	6,10	27,20
C2	22 - 35	6,10	5,38	-0,72	0,10	2,33	0,73	0,00	1,60	3,16	3,16	4,76	21,64	66,40	0,00	0,75	4,70	36,70
C3	35 - 50	6,90	5,93	-0,97	0,06	2,05	0,65	0,00	1,00	2,76	2,76	3,76	28,92	73,40	0,00	0,45	6,10	41,10
C4	50 - 70	6,26	5,52	-0,74	0,06	2,83	0,91	0,00	1,40	3,80	3,80	5,20	21,67	73,10	0,00	0,90	7,30	32,60
C5	70 - 85	6,15	5,34	-0,81	0,05	2,14	0,65	0,00	1,40	2,84	2,84	4,24	21,20	67,00	0,00	0,67	4,40	35,00
C6	85 - 135	6,54	5,50	-1,04	0,06	3,79	1,30	0,00	1,60	5,15	5,15	6,75	18,24	76,30	0,00	1,18	5,50	27,90
C7	135 - 145+	6,91	5,97	-0,94	0,04	2,35	1,06	0,00	0,80	3,45	3,45	4,25	22,37	81,20	0,00	0,52	3,80	36,00

Continua...

Quadro 7. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
----- cmol _c dm ⁻³ -----														----- % -----		dag dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹
P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																		
A	0 - 5	6,48	5,86	-0,62	0,15	2,26	0,75	0,00	1,60	3,16	3,16	4,76	29,75	66,40	0,00	0,75	7,40	39,90
C1	5 - 40	6,09	5,17	-0,92	0,06	2,98	1,17	0,00	2,60	4,21	4,21	6,81	22,70	61,80	0,00	1,13	3,10	35,60
C2	40 - 60	6,34	5,01	-1,33	0,04	2,06	1,14	0,00	1,90	3,24	3,24	5,14	22,35	63,00	0,00	0,67	2,60	34,40
C3	60 - 75	6,65	4,86	-1,79	0,06	2,05	1,10	0,00	2,10	3,21	3,21	5,31	19,67	60,50	0,00	0,60	2,60	34,20
C4	75 - 103	6,59	4,93	-1,66	0,05	1,95	0,82	0,00	2,60	2,82	2,82	5,42	17,48	52,00	0,00	0,75	4,00	32,20
C5	103 - 150+	6,04	5,04	-1,00	0,04	1,83	0,95	0,00	2,60	2,82	2,82	5,42	15,94	52,00	0,00	0,90	4,00	33,30
P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																		
A	0 - 13	5,35	4,48	-0,87	0,12	1,02	0,47	0,20	2,70	1,61	1,81	4,31	28,73	37,40	11,00	1,35	1,80	41,20
C1	13 - 20	5,42	4,59	-0,83	0,06	1,90	0,77	0,10	2,70	2,73	2,83	5,43	30,17	50,30	3,50	1,50	1,40	43,20
C2	20 - 28	5,54	5,19	-0,35	0,03	0,76	0,22	0,00	1,00	1,01	1,01	2,01	40,20	50,20	0,00	0,08	1,00	46,10
C3	28 - 37	5,82	5,24	-0,58	0,04	0,93	0,25	0,00	1,30	1,22	1,22	2,52	36,00	48,40	0,00	0,30	1,00	48,40
C4	37 - 55	6,00	5,24	-0,76	0,06	2,39	1,09	0,00	2,60	3,54	3,54	6,14	21,93	57,70	0,00	1,42	2,00	33,80
C5	55 - 75	6,34	5,38	-0,96	0,03	1,18	0,67	0,00	1,60	1,88	1,88	3,48	23,20	54,00	0,00	0,60	0,80	38,10
C6	75 - 105	6,27	5,59	-0,68	0,04	1,15	0,92	0,00	1,10	2,11	2,11	3,21	13,96	65,70	0,00	0,52	0,90	29,30
C7	105 - 150	5,68	5,10	-0,58	0,04	0,48	1,92	0,00	2,10	2,44	2,44	4,54	7,83	53,70	0,00	0,67	1,00	16,40
C8	150 - 175+	6,50	5,70	-0,80	0,03	0,10	1,64	0,00	1,30	1,77	1,77	3,07	8,53	57,70	0,00	0,30	0,70	17,40

Continua...

Quadro 7. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	^{pH} H ₂ O	^{pH} KCl	ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
----- cmol _c dm ⁻³ -----														---- % ----	dag dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹	
P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico																		
A	0 -25	5,89	5,16	-0,73	0,08	0,83	0,27	0,00	1,30	1,18	1,18	2,48	35,43	47,60	0,00	0,30	3,40	43,80
C1	25 - 33	6,09	5,32	-0,77	0,06	0,67	0,15	0,00	1,10	0,88	0,88	1,98	24,75	44,40	0,00	0,23	3,20	50,10
C2	33 - 52	5,32	4,64	-0,68	0,06	2,42	0,81	0,10	4,30	3,29	3,39	7,59	17,25	43,30	2,90	1,57	2,20	30,10
C3	52 - 63	5,54	4,57	-0,97	0,06	1,17	0,40	0,00	1,90	1,63	1,63	3,53	29,42	46,20	0,00	0,38	2,60	37,60
C4	63 - 130	5,86	5,10	-0,76	0,06	2,57	1,36	0,00	3,50	3,99	3,99	7,49	13,87	53,30	0,00	1,20	2,20	20,40
C5	130 - 140+	5,75	5,01	-0,74	0,05	0,61	0,23	0,00	1,10	0,89	0,89	1,99	22,11	44,70	0,00	0,23	2,50	48,40

^{1/} SB = Soma de bases. ^{2/} t = Capacidade de troca catiônica efetiva. ^{3/} T = Capacidade de troca catiônica a pH 7,0. ^{4/} CTCr = Atividade da fração argila. ^{5/} V = Saturação por bases. ^{6/} m = Saturação por alumínio trocável. ^{7/} CO = Carbono orgânico do solo. ^{8/} P rem = Fósforo remanescente.

Quadro 8. Caracterização química dos sedimentos fluviais das margens esquerda e direita do rio Doce

Prof. (cm)	pH		ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
	H ₂ O	KCl															
----- cmol _c dm ⁻³ ----- ----- % ----- dag dm ⁻³ mg dm ⁻³ mg L ⁻¹																	
S1 - Foz do Rio Piranga																	
Margem Direita																	
0 - 30	5,77	4,34	-1,43	0,06	0,50	0,40	0,10	1,80	0,96	1,06	2,76	39,43	34,80	9,40	0,23	10,80	25,00
S2 - Foz do Rio Carmo																	
Margem Esquerda																	
0 - 30	6,20	5,35	-0,85	0,02	0,20	0,12	0,00	0,50	0,34	0,34	0,84	84,00	40,50	0,00	0,67	4,10	33,90
S3 - Nascente do Rio Doce																	
Margem Esquerda																	
0 - 30	5,52	4,62	-0,90	0,03	0,40	0,20	0,10	3,10	0,63	0,73	3,73	28,69	16,90	13,70	0,52	3,70	18,50
Margem Direita																	
0 - 10	6,33	5,32	-1,01	0,06	0,88	0,38	0,00	1,00	1,32	1,32	2,32	46,40	56,90	0,00	0,15	6,60	29,60
S4 - Foz do Rio Casca																	
Margem Direita (Antes)																	
0 - 30	5,60	4,54	-1,06	0,08	0,36	0,17	0,10	3,20	0,61	0,71	3,81	20,05	16,00	14,10	0,75	3,60	14,20
S5 - Ipatinga (MG)																	
Margem Direita (Antes)																	
0 - 40	6,33	5,11	-1,22	0,03	1,05	1,27	0,00	1,30	2,35	2,35	3,65	15,21	64,40	0,00	0,38	4,30	19,70
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 27	6,37	5,36	-1,01	0,06	1,14	0,33	0,00	0,80	1,53	1,53	2,33	33,29	65,70	0,00	0,23	6,00	28,70
Margem Direita (Depois)																	
0 - 45	6,67	5,18	-1,49	0,06	1,06	0,88	0,00	1,00	2,00	2,00	3,00	18,75	66,70	0,00	0,08	5,50	20,50

Continua...

Quadro 8. Continuação ...

Prof. (cm)	pH		ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
	H ₂ O	KCl															
----- cmol _c dm ⁻³ -----																	
----- % -----																	
dag dm ⁻³																	
mg dm ⁻³																	
mg L ⁻¹																	
S6 - Naque (MG) - Foz Rio Santo Antonio																	
Margem Esquerda (Antes)																	
0 - 30	6,25	5,53	-0,72	0,05	1,32	0,54	0,00	1,00	1,91	1,91	2,91	48,50	65,60	0,00	0,52	5,70	35,10
Margem Direita (Antes)																	
0 - 25	5,81	4,93	-0,88	0,11	1,62	0,39	0,00	2,70	2,12	2,12	4,82	21,91	44,00	0,00	1,47	8,00	23,50
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 35	6,04	4,52	-1,52	0,05	0,43	0,20	0,00	1,00	0,68	0,68	1,68	24,00	40,50	0,00	0,30	4,20	43,60
Margem Direita (Depois)																	
0 - 20	5,81	4,97	-0,84	0,08	0,94	0,33	0,00	1,30	1,35	1,35	2,65	53,00	50,90	0,00	0,52	6,10	40,50
S7 - Governador Valadares (MG)																	
Margem Esquerda (Antes)																	
0 - 20	6,61	5,41	-1,20	0,08	0,35	0,28	0,00	0,50	0,71	0,71	1,21	40,33	58,70	0,00	0,15	6,40	41,50
Margem Direita (Antes)																	
0 - 45	6,30	5,47	-0,83	0,08	1,99	0,57	0,00	1,80	2,64	2,64	4,44	20,18	59,50	0,00	1,18	9,40	24,80
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 36	6,80	5,70	-1,10	0,05	0,58	0,24	0,00	0,60	0,87	0,87	1,47	147,00	59,20	0,00	0,15	8,60	50,50
Margem Direita (Depois)																	
0 - 30	5,70	4,73	-0,97	0,06	1,27	0,35	0,00	2,90	1,68	1,68	4,58	28,63	36,70	0,00	1,10	10,70	30,70
S8 - Resplendor (MG)																	
Margem Esquerda (Antes)																	
0 - 26	6,65	5,60	-1,05	0,09	2,37	0,86	0,00	1,40	3,32	3,32	4,72	19,67	70,30	0,00	1,03	7,10	25,00

Continua...

Quadro 8. Continuação ...

Prof. (cm)	pH		ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
	H ₂ O	KCl															
----- cmol _c dm ⁻³ -----																	
----- % -----																	
dag dm ⁻³																	
mg dm ⁻³																	
mg L ⁻¹																	
S8 - Resplendor (MG)																	
Margem Direita (Antes)																	
0 - 36	6,66	5,76	-0,90	0,08	1,26	0,69	0,00	0,60	2,03	2,03	2,63	37,57	77,20	0,00	0,15	6,20	37,40
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 34	6,24	5,10	-1,14	0,05	0,64	0,30	0,00	1,00	0,99	0,99	1,99	39,80	49,70	0,00	0,22	4,30	40,80
Margem Direita (Depois)																	
0 - 10	6,83	5,84	-0,99	0,14	2,78	1,82	0,00	1,40	4,74	4,74	6,14	24,56	77,20	0,00	1,18	6,10	29,60
S9 - Baixo Guandu (ES)																	
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 36	6,88	5,60	-1,28	0,06	1,31	0,76	0,00	0,80	2,13	2,13	2,93	41,86	72,70	0,00	0,44	4,10	39,40
Margem Direita (Depois)																	
0 - 35	6,71	5,74	-0,97	0,08	1,60	0,81	0,00	0,80	2,49	2,49	3,29	65,80	75,70	0,00	0,30	6,20	47,90
S10 - Colatina (ES)																	
Margem Esquerda (Antes)																	
0 - 30	5,88	4,91	-0,97	0,06	1,08	0,40	0,00	1,40	1,54	1,54	2,94	36,75	52,40	0,00	0,37	5,30	37,10
Margem Direita (Antes)																	
0 - 30	5,50	4,46	-1,04	0,09	2,13	0,90	0,10	3,70	3,12	3,22	6,82	20,06	45,70	3,10	1,10	5,80	25,60
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 30	6,09	5,13	-0,96	0,10	2,08	1,17	0,00	1,90	3,35	3,35	5,25	29,17	63,80	0,00	0,81	6,20	32,30
Margem Direita (Depois)																	
0 - 30	6,18	5,32	-0,86	0,02	0,33	0,26	0,00	0,60	0,61	0,61	1,21	40,33	50,40	0,00	0,08	3,00	49,10

Continua...

Quadro 8. Continuação ...

Prof. (cm)	pH		ΔpH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ^{1/}	t ^{2/}	T ^{3/}	CTCr ^{4/}	V ^{5/}	m ^{6/}	CO ^{7/}	P	P rem ^{8/}
	H ₂ O	KCl															
----- cmol _c dm ⁻³ -----																	
----- % -----																	
dag dm ⁻³																	
mg dm ⁻³																	
mg L ⁻¹																	
S11 - Linhares (ES)																	
Margem Esquerda (Antes)																	
0 - 30	5,86	4,63	-1,23	0,03	0,15	0,23	0,00	1,00	0,41	0,41	1,41	20,14	29,10	0,00	0,08	4,40	46,10
Margem Direita (Antes)																	
0 - 19	5,98	4,91	-1,07	0,05	0,52	0,15	0,00	0,80	0,72	0,72	1,52	30,40	47,40	0,00	0,08	4,40	44,50
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 30	6,05	4,87	-1,18	0,07	1,36	0,54	0,00	2,30	1,97	1,97	4,27	26,69	46,10	0,00	0,59	5,70	35,90
Margem Direita (Depois)																	
0 - 28	6,26	5,14	-1,12	0,09	1,19	0,74	0,00	1,60	2,02	2,02	3,62	30,17	55,80	0,00	0,30	8,50	40,30
S12 - Regência (ES)																	
Margem Esquerda (Depois)																	
0 - 31	5,35	4,49	-0,86	0,07	0,90	0,53	0,10	2,70	1,50	1,60	4,20	52,50	35,70	6,30	0,22	3,70	35,60
Margem Direita (Depois)																	
0 - 30	6,07	4,74	-1,33	0,08	1,01	0,75	0,00	1,90	1,84	1,84	3,74	24,93	49,20	0,00	0,74	2,30	34,30

^{1/} SB = Soma de bases. ^{2/} t = Capacidade de troca catiônica efetiva. ^{3/} T = Capacidade de troca catiônica a pH 7,0. ^{4/} CTCr = Atividade da fração argila. ^{5/} V = Saturação por bases. ^{6/} m = Saturação por alumínio trocável. ^{7/} CO = Carbono orgânico do solo. ^{8/} P rem = Fósforo remanescente.

Ao avaliar a saturação por alumínio (m %) para os solos, estes indicam para os solos eutróficos (P3 e P6) valores nulos, uma vez que apresentam pH superior a 5,5 e SB superior a 50 %. Ao contrário dos solos distróficos (P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10 e P11) que apresentam valores de m% variando de 7,40 a 94,50, justificados pelos valores de SB e pH inferiores a 50 % e 5,5, respectivamente. Para os Neossolos Flúvicos e sedimentos, este parâmetro se mostra nulo em todas as amostras analisadas.

Os teores de carbono orgânico (CO) nos horizontes superficiais dos solos variaram de baixos a médio (1,35 a 2,55 dag kg⁻¹), enquanto nos subsuperficiais foram muito baixos (0,30 a 1,30 dag kg⁻¹), evidenciando que seus valores decresceram em profundidade (Quadro 6, 7 e 8). Nos Neossolos Flúvicos e sedimentos os valores de carbono orgânico variaram de 0,08 a 1,57 dag kg⁻¹. Confirmando um dos critérios para a classificação deste solo, todos os perfis de Neossolos Flúvicos apresentaram o caráter flúvico havendo uma distribuição irregular do conteúdo de carbono orgânico em profundidade (SiBCS, 2013).

Avaliando os valores da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 dos solos (P1 a P11) foi observado que os mesmos, por apresentar argila de baixa atividade, mostraram-se dependentes do teor de carbono orgânico (CO), apresentando correlação positiva com seus valores (Figura 9). Esta mesma tendência não ocorreu com os valores da capacidade de troca catiônica efetiva, uma vez que as cargas negativas da matéria orgânica são provenientes da dissociação de H de radicais carboxílicos e fenólicos em valores elevados de pH. Assim, solos com teores elevados de carbono orgânico (CO) terá alta capacidade de troca catiônica a pH 7,0, mas se ácido, poderá ter baixa capacidade de troca catiônica efetiva (Van Raij, 1969; Klamt & Sombroek, 1988; Ciotto, et al., 2003; Canellas et al., 2008). Para os Neossolos Flúvicos com argila de baixa atividade (P16 a P22) se observou a mesma relação positiva (Figura 11). Para os sedimentos (S1 a S12) e Neossolos Flúvicos (P12 a P15) com argila de alta atividade, não se observou esta relação positiva entre seus valores de capacidade de troca catiônica a pH 7,0 e carbono orgânico (Figura 10).

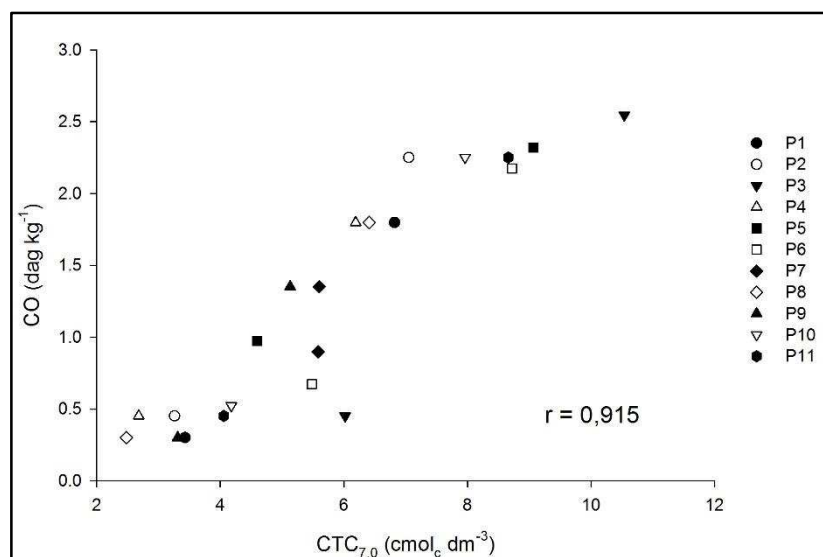


Figura 9. Correlação entre os valores de $CTC_{7,0}$ e teores de carbono orgânico para todos os horizontes dos solos.

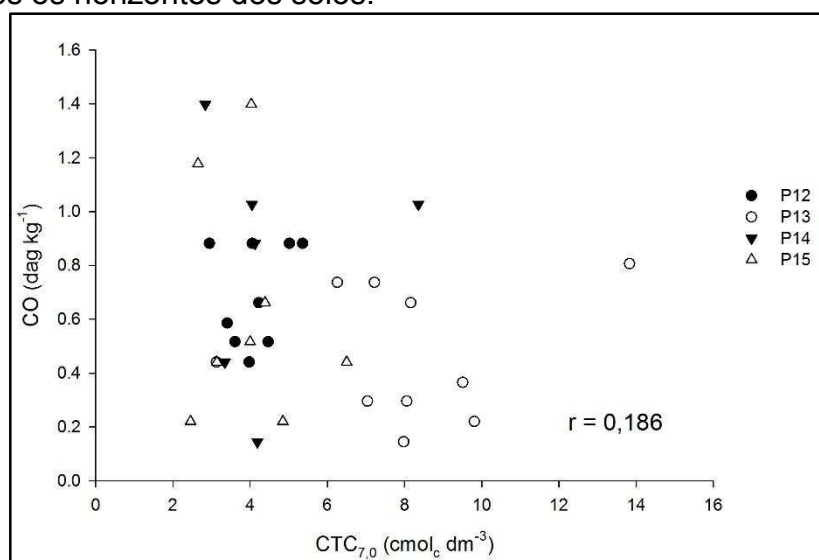


Figura 10. Correlação entre os valores de $CTC_{7,0}$ e teores de carbono orgânico para todos os horizontes dos Neossolos com argila de atividade alta (Ta).

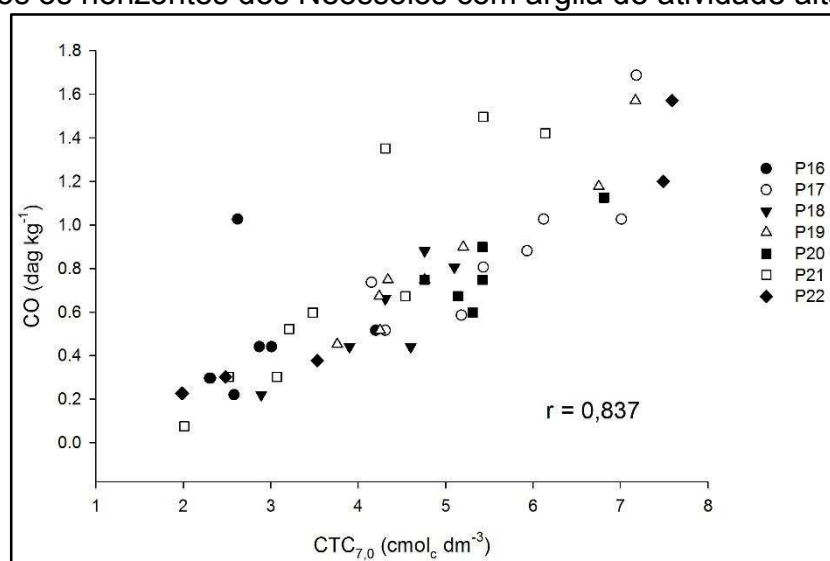


Figura 11. Correlação entre os valores de $CTC_{7,0}$ e teores de carbono orgânico para todos os horizontes dos Neossolos Flúvicos (P16, P17, P18, P19, P20, P21 e P22) com argila de atividade baixa (Tb).

Os teores de P disponível para os solos foram considerados muito baixos (Ribeiro et al., 1999), com valores variando de 0,30 a 2,80 mg dm⁻³. Assim, esses baixos teores estão de acordo com a pobreza do material de origem (CPRM 2005; CPRM, 2013) e com os resultados encontrados por outros autores (Ker, 1997; Pacheco, 2011). Os maiores valores foram encontrados nos horizontes superficiais, fato este ligado à maior presença de matéria orgânica nestes horizontes, cujos componentes de baixo peso molecular competem com os sítios de adsorção de P na fração mineral (Lopez-Hernandez et al., 1986; Mesquita Filho & Torrent, 1993; Bhatti et al., 1998; Guppy, et al., 2005).

Para os Neossolos Flúvicos e sedimentos, os valores de P ficaram entre 0,30 e 18,30 mg dm⁻³, classificados entre muito baixo a médio (Ribeiro et al., 1999). Verificou-se uma correlação positiva de $r=0,65$ entre os teores de CO e P dos solos, efeito este da decomposição da serrapilheira pela comunidade microbiana, liberando o P presente neste material vegetal, uma vez que os solos foram coletados em áreas de mata secundária. Para os Neossolos Flúvicos não houve correlação entre estes parâmetros pelo processo de formação desses solos, devido ao material de origem bastante diversificado e com um baixo grau de desenvolvimento pedogenético (Marques et al., 2007; SiBCS, 2013).

Os valores de Prem dos solos variaram de 9,10 a 40,50 mg L⁻¹ enquanto nos Neossolos Flúvicos e sedimentos estes foram de 11,60 a 50,10 mg L⁻¹ (Quadro 6, 7 e 8). Os valores para os solos estão, em geral, relativamente baixos indicando uma maior capacidade de adsorção, devido aos altos teores de argila. Ao avaliar os Neossolos Flúvicos e sedimentos, estes apresentaram teores de areia, em média, acima de 60 %, justificando seus teores elevados de Prem e sua baixa capacidade de adsorção de ânions. Pacheco (2011), avaliando Latossolo, Cambissolo e Neossolo Flúvico em área com granito e ortognaisse encontrou valores semelhantes de P rem. De acordo com a matriz de correlação linear ($p<5\%$) se observou correlação negativa com $r=-0,57$ entre os teores de Prem e argila dos solos e de $r=-0,33$ para os Neossolos Flúvicos (Quadro 6). Esta correlação mostra a dinâmica de P no solo, onde este se liga nas cargas positivas expostas na superfície dos minerais, pH dependente da fração argila destes materiais.

4.2.2. Teores totais de óxidos pela fluorescência de raios-X

São apresentados no Quadro 9, 10 e 11 os teores totais de Si, Al, Fe, Ti, Mn e P, avaliados pelo método da fluorescência de raios-X, nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos da bacia do rio Doce. Para a confiabilidade destes resultados, foram analisadas as amostras certificadas *San Joaquim Soil* (NIST SRM 2709) e *Montana Soil* (NIST SRM 2710) conforme Apêndice C.

A litologia de influência ao longo da calha principal do rio Doce é formada por ortognaisse, granito-granodiorito e granitóides (CPRM, 2003; CPRM, 2013). Essas rochas são formadas em sua maioria por quartzo, plagioclásio, feldspato, piroxênio, anfibólio e biotita com teores médios de óxidos: SiO₂ (693,25 g kg⁻¹); Al₂O₃ (141,07 g kg⁻¹); Fe₂O₃ (45,19 g kg⁻¹); TiO₂ (5,27 g kg⁻¹); MnO₂ (0,80 g kg⁻¹) e P₂O₅ (2,01 g kg⁻¹) (Bilal et al., 2000; Oliveira, 2002; Gonçalves, 2009; Uhlein, 2014).

Os teores de SiO₂ para os solos variaram de 405,32 a 721,61 g kg⁻¹. Os teores médios de SiO₂ para os Neossolos Flúvicos e sedimentos foi de 609,38 e 684,95 g kg⁻¹, respectivamente (Quadro 10 e 11). Tais valores são relativamente inferiores aos teores médios de SiO₂ (693,25 g kg⁻¹) encontrandos no material de origem dessa bacia (Bilal et al., 2000; Oliveira, 2002; Gonçalves, 2009; Uhlein, 2014) com exceção do horizonte superficial do Cambissolo (P7). Fato este explicado pela perda de sílica no processo de intemperismo (McKeague & Cline, 1963).

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre com 28 % (Wollast & Mckenzie, 1983) e ocorre em mais de 370 minerais formadores de rocha, fazendo parte de quase todos os materiais de origem e um dos componentes de base para a maioria dos solos (Sommer et al., 2006). Dessa forma, avaliando os solos (P1 a P11), observa-se uma perda de Si e um aumento relativo de Fe, Al e Ti nos horizontes subsuperficiais em relação ao superficial (Quadro 9). Este fato é devido ao intemperismo sofrido por seu material de origem no avanço dos processos pedogenéticos provocando a concentração destes no solo. Como pode ser observado na correlação negativa significativa entre Fe, Al, Ti com o silício ($p < 1\%$ e 5%) com $r = -0,75$, $r = -0,63$ e $r = -0,51$, respectivamente. Nesse sentido, Tan & Thoth (1982) sugerem também movimentação de ferro e alumínio com possibilidade de migração de argila em profundidade como justificativa a esse acontecimento.

Quadro 9. Teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO₂ e P₂O₅ pela fluorescência de raios-X e relações moleculares dos solos da parte alta da paisagem

Hor.	Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg ⁻¹ -----									
P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico									
A	0 - 20	631,73	139,24	83,76	19,61	0,87	1,16	7,71	5,58
Bw	80 - 100	503,76	246,46	88,37	17,67	0,41	0,45	3,47	2,83
P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	458,82	329,24	69,34	14,58	0,82	0,52	2,37	2,09
Bw	80 - 100	405,32	377,81	72,19	15,23	0,19	0,47	1,82	1,63
P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico									
A	0 - 20	406,39	219,24	149,44	23,46	7,94	1,10	3,15	2,20
Bt	70 - 90	442,55	380,84	178,04	19,10	4,07	0,57	1,98	1,52
P4 - Argissolo Vermelho Distrófico típico									
A	0 - 20	537,35	282,74	70,84	9,15	0,10	0,15	3,23	2,79
Bt	80 - 100	524,30	289,17	71,57	9,31	0,10	0,01	3,08	2,66
P5 - Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	634,72	218,67	48,75	6,83	0,05	0,29	4,93	4,32
Bw	80 - 100	546,13	284,07	57,01	8,13	0,05	0,12	3,27	2,90
P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico									
A	0 - 20	536,28	242,87	72,10	9,13	0,94	0,48	3,75	3,16
Bt	80 - 100	450,68	316,39	106,25	11,30	0,49	0,27	2,42	1,99
P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico									
A	0 - 20	721,61	190,70	47,96	7,21	0,63	0,40	6,43	5,54
Bi	30 - 50	546,56	300,51	95,02	9,82	0,59	0,46	3,09	2,57
P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico									
A	0 - 20	639,65	155,62	47,48	7,77	0,43	0,24	6,99	5,85
Bt	80 - 100	540,14	215,84	69,68	10,66	0,46	0,04	4,25	3,53
P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	631,73	192,21	69,03	13,16	0,24	0,19	5,59	4,55
Bw	80 - 100	469,94	301,83	108,79	16,98	0,22	0,21	2,65	2,15
P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	610,54	252,13	31,52	13,71	0,11	0,04	4,12	3,81
Bw	80 - 100	555,54	293,52	37,45	15,36	0,10	0,01	3,22	2,98
P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico									
A	0 - 20	432,71	319,60	73,19	14,20	1,01	0,94	2,30	2,01
Bi	80 - 100	419,23	330,18	107,31	13,44	0,32	0,68	2,16	1,79

^{1/} Kif = (SiO₂×1,70/Al₂O₃). ^{2/} Krf = [(SiO₂/0,60)/((Al₂O₃/1,02) + (Fe₂O₃/1,60))]. Relações moleculares pela fluorescência de raios-X.

Quadro 10. Teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO₂ e P₂O₅ pela fluorescência de raios-X e relações moleculares dos Neossolos Flúvicos

Hor.	Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg ⁻¹ -----									
P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico									
A	0 - 10	691,65	184,92	113,94	6,94	1,98	0,91	6,36	4,57
C1	10 - 20	653,56	218,30	113,89	7,82	2,05	0,78	5,09	3,82
C2	20 - 33	585,93	275,94	118,16	9,97	2,10	1,00	3,61	2,84
C3	33 - 40	630,02	229,82	128,20	7,70	2,40	1,04	4,66	3,44
C4	40 - 55	656,34	197,88	137,07	6,67	2,76	0,69	5,64	3,91
C5	55 - 65	702,78	168,00	121,45	5,50	2,92	0,63	7,11	4,87
C6	65 - 90	567,31	250,99	164,74	7,20	4,86	0,92	3,84	2,71
C7	90 - 120	547,63	297,30	135,81	9,24	3,07	0,97	3,13	2,43
C8	120 - 180+	618,25	240,79	127,73	7,61	2,31	0,90	4,36	3,26
P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico									
A	0 - 10	809,78	109,66	72,47	7,29	1,02	0,55	12,55	8,83
C1	4 - 20	557,47	156,55	87,03	8,66	1,80	0,99	6,05	4,47
C2	10 - 70	810,20	124,29	53,71	5,29	1,07	0,44	11,08	8,69
C3	70 - 84	617,60	243,24	122,44	9,37	2,40	1,15	4,32	3,27
C4	71 - 95	715,19	160,65	116,90	7,77	1,52	0,58	7,57	5,17
C5	81 - 112	590,43	267,62	121,66	9,49	3,23	1,13	3,75	2,91
C6	102 - 122	667,25	205,25	108,72	9,07	1,69	0,75	5,53	4,13
C7	109 - 133	481,07	215,84	129,90	11,09	2,49	1,10	3,79	2,74
C8	118 - 141	705,56	181,21	91,62	8,23	1,47	0,54	6,62	5,01
C9	132 - 141+	551,48	293,90	134,79	9,82	2,75	1,11	3,19	2,47
P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico									
A	0 - 4	386,91	273,11	170,74	13,71	1,69	1,47	2,41	1,72
C1	4 - 24	404,03	221,70	210,35	12,05	3,84	1,20	3,10	1,93
C2	24 - 36	367,87	336,80	154,30	13,80	2,61	1,70	1,86	1,44
C3	36 - 80	460,96	358,91	162,16	12,65	2,14	1,63	2,18	1,70
C4	80 - 110	962,36	32,32	24,10	1,35	0,37	0,26	50,62	34,31
Cg	110 - 120	569,88	223,78	105,12	11,07	2,15	0,94	4,33	3,33
P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico									
A	0 - 10	666,18	229,45	87,23	7,82	1,22	0,54	4,94	3,97
C1	10 - 45	772,75	157,17	59,57	5,62	0,77	0,22	8,36	6,73
C2	45 - 87	520,88	209,98	95,44	10,38	1,62	1,02	4,22	3,27
C3	87 - 105	774,68	152,58	65,15	6,21	0,72	0,29	8,63	6,78
C4	105 - 120	485,99	313,93	121,04	11,57	2,30	1,53	2,63	2,11
C5	120 - 130	646,49	243,81	88,23	8,45	1,23	0,62	4,51	3,66
C6	130 - 140	803,78	126,97	67,37	5,56	0,62	0,09	10,76	8,04
C7	140 - 170	466,52	263,47	110,31	11,57	1,80	1,23	3,01	2,38

^{1/} Kif = (SiO₂×1,70/Al₂O₃). ^{2/} Krf = [(SiO₂/0,60)/((Al₂O₃/1,02) + (Fe₂O₃/1,60))]. Relações moleculares pela fluorescência de raios-X.

Quadro 10. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg ⁻¹ -----									
P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 8	736,37	194,10	60,72	7,59	0,73	0,01	6,45	5,38
C1	8 - 28	669,82	256,47	62,52	7,80	0,75	0,45	4,44	3,84
C2	28 - 59	620,39	294,08	68,03	8,84	0,86	0,59	3,59	3,13
C3	59 - 70	801,64	145,08	48,26	6,73	0,63	0,01	9,39	7,75
C4	70 - 105	811,49	146,13	42,77	5,30	0,65	0,16	9,44	7,96
C5	105 - 130	848,72	118,62	36,16	4,45	0,55	0,20	12,16	10,18
C6	130 - 160+	468,45	266,30	97,10	11,58	1,73	1,32	2,99	2,43
P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 18	650,77	242,30	76,45	8,87	1,14	0,57	4,57	3,80
C1	18 - 22	447,90	264,98	111,98	13,01	1,87	1,01	2,87	2,26
C2	22 - 40	548,91	245,70	99,70	10,00	1,70	0,82	3,80	3,02
C3	40 - 61	530,93	228,88	97,01	10,93	1,40	0,45	3,94	3,10
C4	61 - 85	437,20	227,37	114,07	11,53	1,72	0,80	3,27	2,48
C5	85 - 108	597,49	280,48	93,02	9,36	1,30	0,50	3,62	2,99
C6	108 - 117	416,87	281,42	131,29	13,51	1,93	0,91	2,52	1,94
C7	117 - 135	400,39	295,41	143,72	12,50	2,87	1,45	2,30	1,76
P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 15	787,52	157,89	46,95	5,65	0,70	0,65	8,48	7,13
AC	15 - 20	650,35	245,89	83,24	8,94	1,16	0,56	4,50	3,70
C1	20 - 30	519,59	209,22	87,72	10,12	1,34	0,50	4,22	3,33
C2	30 - 57	762,70	181,16	47,35	7,41	0,79	0,01	7,16	6,14
C3	57 - 74	730,38	208,28	47,56	8,55	0,71	0,01	5,96	5,20
C4	74 - 120+	793,94	161,82	35,64	6,73	0,47	0,01	8,34	7,31
P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 10	721,61	205,63	54,50	8,04	0,82	0,73	5,97	5,10
C1	10 - 22	412,59	302,59	115,54	13,18	2,62	1,79	2,32	1,86
C2	22 - 35	555,54	233,60	81,12	9,51	1,36	0,80	4,04	3,31
C3	35 - 50	655,48	250,61	65,75	7,31	0,91	0,49	4,45	3,81
C4	50 - 70	499,90	256,85	88,93	10,96	1,59	0,95	3,31	2,71
C5	70 - 85	561,54	322,25	87,59	9,80	1,42	0,81	2,96	2,52
C6	85 - 135	427,14	292,19	118,19	12,56	2,64	1,06	2,49	1,98
C7	135 - 145+	611,40	275,94	89,03	9,75	1,09	0,35	3,77	3,12
P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 5	455,61	243,24	98,93	11,09	1,62	0,84	3,18	2,53
C1	5 - 40	572,66	253,83	91,66	10,00	1,89	1,04	3,84	3,12
C2	40 - 60	530,51	335,85	104,23	10,80	1,58	0,91	2,69	2,24
C3	60 - 75	566,03	310,15	89,16	10,16	1,21	0,59	3,10	2,62
C4	75 - 103	488,78	261,39	98,81	10,82	1,75	1,18	3,18	2,56
C5	103 - 150+	475,94	239,46	96,32	11,07	1,79	1,15	3,38	2,69

^{1/} Kif = (SiO₂×1,70/Al₂O₃). ^{2/} Krf = [(SiO₂/0,60)/((Al₂O₃/1,02) + (Fe₂O₃/1,60))]. Relações moleculares pela fluorescência de raios-X.

Quadro 10. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg ⁻¹ -----									
P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 13	746,65	184,26	57,89	6,66	0,68	0,27	6,89	5,74
C1	13 - 20	629,80	255,34	99,16	10,56	1,13	0,01	4,19	3,36
C2	20 - 28	698,07	160,10	128,19	13,58	0,79	0,01	7,41	4,91
C3	28 - 37	770,61	166,04	51,95	5,10	0,63	0,22	7,89	6,58
C4	37 - 55	528,37	219,43	92,22	9,87	1,33	0,66	4,09	3,23
C5	55 - 75	706,41	187,90	103,83	7,33	0,94	0,36	6,39	4,73
C6	75 - 105	486,64	245,13	116,65	11,25	1,75	0,69	3,37	2,59
C7	105 - 150	367,01	334,34	152,30	13,64	2,58	1,69	1,87	1,45
C8	150 - 175+	434,85	296,54	91,32	11,78	0,41	0,47	2,49	2,08
P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico									
A	0 - 25	803,57	145,61	43,70	5,87	0,50	0,26	9,38	7,88
C1	25 - 33	888,53	86,94	27,67	3,60	0,38	0,29	17,37	14,44
C2	33 - 52	435,28	292,76	105,38	12,23	1,51	1,34	2,53	2,06
C3	52 - 63	680,31	225,48	70,40	7,70	0,68	0,38	5,13	4,28
C4	63 - 130	390,12	313,36	138,87	13,08	4,02	1,46	2,12	1,65
C5	130 - 140+	796,72	150,22	45,00	4,83	0,34	0,37	9,02	7,57

^{1/} Kif = (SiO₂×1,70/Al₂O₃). ^{2/} Krf = [(SiO₂/0,60)/((Al₂O₃/1,02) + (Fe₂O₃/1,60))]. Relações moleculares pela fluorescência de raios-X.

Quadro 11. Teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO₂ e P₂O₅ pela fluorescência de raios-X e relações moleculares dos sedimentos fluviais das margens esquerda e direita do rio Doce

Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg ⁻¹ -----								
S1 - Foz do Rio Piranga								
Margem Direita								
0-10	751,57	181,63	48,76	9,84	0,54	0,01	7,03	6,01
10-20	620,17	281,99	55,64	24,88	0,72	0,01	3,74	3,32
20-30	720,32	202,42	56,04	12,12	0,64	0,01	6,05	5,14
S2 - Foz do Rio Carmo								
Margem Esquerda								
0-10	754,56	77,68	175,46	4,78	2,51	0,42	16,51	6,77
10-20	740,65	64,09	203,63	5,28	2,29	0,40	19,65	6,49
20-30	845,51	53,01	112,37	3,15	1,65	0,27	27,11	11,53
S3 - Nascente do Rio Doce								
Margem Esquerda								
0-10	681,38	162,65	152,72	8,11	0,91	0,44	7,12	4,45
10-20	426,07	290,30	133,88	11,52	2,43	1,82	2,50	1,93
20-30	771,26	152,03	60,98	5,74	0,67	0,52	8,62	6,87
Margem Direita								
0-10	746,86	163,14	78,24	6,12	1,40	0,53	7,78	5,96

Continua....

Quadro 11. Continuação ...

Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg-1 -----								
S4 - Foz do Rio Casca								
Margem Direita (Antes)								
0-10	575,87	241,16	121,62	11,15	1,28	1,57	4,06	3,07
10-20	413,66	242,68	134,53	13,63	1,42	1,67	2,90	2,14
20-30	483,64	286,34	149,15	12,38	1,17	1,47	2,87	2,16
S5 - Ipatinga (MG)								
Margem Direita (Antes)								
0-10	591,92	281,42	111,15	14,33	1,00	0,05	3,58	2,86
10-25	456,03	307,31	101,76	15,72	0,86	1,35	2,52	2,08
25-40	530,08	364,20	89,80	13,29	0,65	1,14	2,47	2,14
Margem Esquerda (Depois)								
0-13	511,03	346,63	127,66	11,36	2,83	1,75	2,51	2,03
13-27	819,83	120,36	61,89	5,19	0,65	0,21	11,58	8,72
Margem Direita (Depois)								
0-15	620,81	272,16	93,92	8,94	1,66	1,36	3,88	3,18
15-30	584,86	295,41	105,81	10,20	1,80	1,11	3,37	2,74
30-45	592,99	289,36	106,64	9,67	2,04	1,30	3,48	2,82
S6 - Naque (MG) - Foz Rio Santo Antonio								
Margem Esquerda (Antes)								
0-10	671,96	196,94	117,13	10,13	0,85	0,01	5,80	4,21
10-20	468,23	218,48	99,56	10,88	1,07	0,83	3,64	2,82
20-30	669,18	227,18	84,08	7,33	1,16	0,52	5,01	4,05
Margem Direita (Antes)								
0-12	484,28	272,35	126,35	12,29	2,06	1,53	3,02	2,33
12-25	557,26	310,15	115,20	10,52	1,55	1,07	3,05	2,47
Margem Esquerda (Depois)								
0-12	700,42	225,10	61,20	7,22	0,76	0,01	5,29	4,51
12-23	610,33	299,19	80,44	8,55	1,35	0,81	3,47	2,96
23-35	811,06	136,68	45,66	7,59	0,48	0,01	10,09	8,32
Margem Direita (Depois)								
0-10	734,66	183,07	68,01	6,15	0,97	0,46	6,82	5,52
10-20	631,73	259,69	89,76	8,84	1,22	0,77	4,14	3,39
S7 - Governador Valadares (MG)								
Margem Esquerda (Antes)								
0-10	886,17	80,15	35,98	4,79	0,30	0,01	18,79	14,61
10-20	766,33	165,20	57,57	7,13	0,48	0,01	7,89	6,45
Margem Direita (Antes)								
0-15	446,62	256,28	110,08	11,10	1,87	1,13	2,96	2,33
15-30	533,93	342,28	107,98	10,54	1,48	1,13	2,65	2,21
30-45	453,68	299,57	118,42	11,65	2,07	1,40	2,57	2,06

Continua....

Quadro 11. Continuação ...

Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg-1 -----								
S7 - Governador Valadares (MG)								
Margem Esquerda (Depois)								
0-12	829,04	128,60	38,08	3,61	0,50	0,01	10,96	9,22
12-24	807,64	128,92	55,64	5,99	0,57	0,01	10,65	8,35
24-36	833,10	126,03	38,07	3,96	0,48	0,01	11,24	9,42
Margem Direita (Depois)								
0-10	640,72	268,95	76,26	7,50	0,63	0,01	4,05	3,43
10-20	636,86	283,88	64,45	7,11	0,70	0,65	3,81	3,33
20-30	707,70	226,80	46,69	5,18	0,54	0,36	5,30	4,69
S8 - Resplendor (MG)								
Margem Esquerda (Antes)								
0-13	714,97	192,21	75,79	10,25	0,66	0,01	6,32	5,05
13-26	556,83	322,81	101,92	10,34	1,10	1,13	2,93	2,44
Margem Direita (Antes)								
0-12	753,71	170,59	43,69	5,45	0,52	0,31	7,51	6,46
12-24	704,06	217,35	54,04	6,60	0,68	0,46	5,51	4,75
24-36	718,40	188,06	70,18	8,69	0,71	0,01	6,49	5,25
Margem Esquerda (Depois)								
0-17	708,55	212,63	62,42	7,14	0,91	0,49	5,67	4,77
17-34	830,11	118,28	43,77	6,05	0,42	0,01	11,93	9,65
Margem Direita (Depois)								
0-10	635,37	282,18	69,78	9,40	1,09	0,44	3,83	3,31
S9 - Baixo Guandu (ES)								
Margem Esquerda (Depois)								
0-11	803,57	141,20	46,43	6,92	0,76	0,01	9,67	8,00
11-24	792,87	153,92	41,51	7,61	0,66	0,01	8,76	7,47
24-36	857,71	110,05	28,79	4,15	0,50	0,07	13,25	11,36
Margem Direita (Depois)								
0-15	762,91	177,96	29,54	7,28	0,35	0,01	7,29	6,59
15-24	773,18	169,65	27,67	7,63	0,33	0,01	7,75	7,02
24-35	760,34	171,54	35,32	6,71	0,45	0,10	7,54	6,66
S10 - Colatina (ES)								
Margem Esquerda (Antes)								
0-15	625,09	273,48	83,60	8,80	1,69	0,60	3,89	3,25
15-30	739,58	186,85	51,79	6,24	0,79	0,13	6,73	5,72
Margem Direita (Antes)								
0-15	427,36	269,89	107,62	12,64	1,54	1,17	2,69	2,15
15-30	502,04	233,79	86,76	10,89	1,14	1,01	3,65	2,95
Margem Esquerda (Depois)								
0-30	514,24	229,07	80,67	10,74	1,22	0,94	3,82	3,12
Margem Direita (Depois)								
0-15	949,30	42,43	12,72	1,39	0,43	0,20	38,03	31,93
15-30	969,63	32,47	9,48	1,23	0,30	0,19	50,77	42,80

Continua....

Quadro 11. Continuação ...

Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	Kif ^{1/}	Krf ^{2/}
----- g kg ⁻¹ -----								
S11 - Linhares (ES)								
Margem Esquerda (Antes)								
0-30	893,45	79,06	25,15	4,53	0,28	0,12	19,21	15,97
Margem Direita (Antes)								
0-17	888,53	86,90	25,97	3,03	0,61	0,19	17,38	14,60
17-20	698,28	229,07	58,30	6,70	0,90	0,65	5,18	4,46
20-25	928,97	57,34	19,13	2,39	0,23	0,17	27,54	22,71
Margem Esquerda (Depois)								
0-14	744,72	184,60	56,60	7,02	0,76	0,28	6,86	5,74
14-33	454,11	250,24	96,55	11,26	1,43	1,27	3,09	2,48
Margem Direita (Depois)								
0-17	702,56	229,45	60,57	8,04	0,72	0,29	5,21	4,46
17-28	737,02	204,88	48,72	6,51	0,58	0,45	6,12	5,31
S12 - Regência (ES)								
Margem Esquerda (Depois)								
0-22	670,25	240,79	63,82	7,70	0,81	0,36	4,73	4,05
22-33	968,14	31,22	16,17	2,83	0,18	0,01	52,71	39,63
Margem Direita (Depois)								
0-19	766,98	180,87	49,79	5,32	1,05	0,71	7,21	6,13
19-32	698,50	225,29	70,50	7,40	1,40	0,81	5,27	4,39

^{1/} Kif = (SiO₂ × 1,70 / Al₂O₃). ^{2/} Krf = [(SiO₂ / 0,60) / ((Al₂O₃ / 1,02) + (Fe₂O₃ / 1,60))]. Relações moleculares pela fluorescência de raios-X.

Os teores de Al₂O₃ para os solos variaram de 139,24 a 380,84 g kg⁻¹, sendo que os maiores valores foram observados nos horizontes subsuperficiais (Quadro 9). Para os Neossolos Flúvicos e sedimentos, seus teores médios foram de 227,29 e 202,77 g kg⁻¹, respectivamente (Quadro 10 e 11). Tais teores são superiores aos encontrados no material de origem, que em média para esta bacia foi de 141,07 g kg⁻¹ (Gonçalves, 2009; Uhlein, 2014). Isso é justificado pelo processo contínuo do intemperismo, onde a sílica é perdida, propiciando uma concentração relativa de Al mantida na estrutura da caulinita e da gibbsita. Avaliando a mineralogia, foi observada a presença de gibbsita em todos os Neossolos Flúvicos e sedimentos, onde uma maior lixiviação de Si pelas águas do rio pode favorecer sua formação. Nos solos a gibbsita se mostra presente apenas no P1, P2, P4, P5, P7 e P11. Mesmo com teores de Si próximo e até menores aos Neossolos Flúvicos e sedimentos, este fato é explicado por McKeague & Cline (1963), onde concentrações de silício em solução são governadas por um mecanismo de adsorção-dessorção entre Si e materiais

reativos, principalmente sesquióxidos. Este fato possibilita que a adsorção de Si(OH)_4 na superfície dos óxidos de Fe e Al contribua para a formação de filmes de material amorfo que, posteriormente recoberto por películas desses óxidos, venha a ser convertido na forma oclusa, diminuindo assim seu teor em solução favorecendo a formação da gibbsita.

Os teores de Fe_2O_3 para os solos variaram de 31,52 a 149,44 g kg^{-1} nos horizontes superficiais e de 37,45 a 178,04 g kg^{-1} nos subsuperficiais (Quadro 10), mostrando-se de forma geral, maiores teores em profundidade. Teores médios de Fe_2O_3 , na faixa de 45,19 g kg^{-1} , foram encontrados nas rochas presentes na área de estudo (Gonçalves, 2009; Uhlein, 2014). Esses valores são inferiores aos encontrados nos solos, explicados pelos processos pedogenéticos, que formaram os óxidos de ferro (hematita e goethita). Solos muito vermelhos (10R) ou muito amarelos (10YR) apresentaram os maiores teores de Fe_2O_3 , mostrando a presença de hematitas e goethitas, respectivamente (Schwertmann, 1993; Cornell & Schwertmann, 1996). Para os Neossolos Flúvicos os teores variaram de 24,10 a 210,35 g kg^{-1} (Quadro 10), de forma aleatória, em profundidade e ao longo dos pontos de coleta, confirmando novamente, seu caráter flúvico (SiBCS, 2013). Os sedimentos apresentaram teores de 9,48 a 203,63 g kg^{-1} , onde os maiores valores foram encontrados no S2 (foz do rio do Carmo) e S3 (nascente do rio Doce). Este fato se deve a influência litogênica com materiais como itabirito, filito e xisto da região de Ouro Preto e Mariana, rota do rio do Carmo, transportando estes materiais para o rio Doce (CPRM, 2003; CPRM, 2013).

Para os teores de TiO_2 dos solos (P1 a P11), estes estão distribuídos de forma homogênea em profundidade (Quadro 9). Para os Neossolos Flúvicos (P12 a P22) como também para os sedimentos (S1 a S12), estes teores variaram de 2,83 a 13,80 g kg^{-1} (Quadro 9 e 11). Estes teores são, em alguns casos, superiores aos encontrados na litologia da área, que foi em média de 5,27 g kg^{-1} . Estes teores estão associados ao mineral anatásio, encontrado na fração areia e silte de todos os solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos (difratogramas não apresentados). Os teores médios de MnO_2 e P_2O_5 encontrados nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos foram de 0,92; 1,59 ;1,01 g kg^{-1} e 0,40; 0,74; 0,54 g kg^{-1} , respectivamente (Quadro 9, 10 e 11). Comparando com os teores médios de MnO_2 do material de origem da área, verificamos que o mesmo está inferior ao encontrado nos solos e sedimentos analisados. Para os teores de

P₂O₅ do material de origem, observa-se teores médios de 2,01 g kg⁻¹, relativamente superior aos encontrados nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos desta bacia (Bilal et al., 2000; Oliveira, 2002; Gonçalves, 2009; Uhlein, 2014).

De acordo com Embrapa (2011) as relações moleculares K_i e K_r são determinadas utilizando os teores de Si, Al e Fe, extraídos pelo ataque sulfúrico da fração argila dos solos. Seus resultados indicam o grau de intemperismo, sendo valores inferiores a 2,2, encontrados em solos com alto grau de intemperismo como observado em Latossolos (Ker, 1997). Uma vez que os teores de Si, Al e Fe para o presente trabalho foram determinados por fluorescência de raios-X e esta técnica indica teores totais destes elementos, considerando todas as frações do solo, o cálculo das relações moleculares foram realizadas com a finalidade de verificar quão diferentes seriam estes valores, comparando-se com o método padrão. Os valores da relação molecular K_{if} teve variação para os solos (P1 a P11) de 2,30 a 7,71 para os horizontes superficiais e de 2,16 a 4,25 nos subsuperficiais (Quadro 9). Para o K_{rf} esses valores variaram de 2,01 a 5,58 em superfície e de 1,52 a 3,53 em subsuperfície. Observa-se que, à medida que o material de origem é alterado e evolui o grau de pedogênese, nos horizontes subsuperficiais, ocorrem perdas mais intensas dos teores de Si e aumento relativo de Fe, Al e Ti. Assim, os valores de K_{if} e K_{rf} foram menores nos horizontes subsuperficiais, indicando o maior grau de intemperização dos solos (Quadro 9). Martins (2010) e Araujo (2011), utilizando a mesma técnica também determinaram as mesmas relações moleculares e obtiveram resultados semelhantes.

Os valores de K_{if} e K_{rf} dos Neossolos Flúvicos e sedimentos se mostraram superiores aos observados para os solos devido a maior proporção da fração areia nesses materiais e conseqüentemente maiores teores de Si (Quadro 10 e 11). Para os Neossolos Flúvicos ao se avaliar K_{if} e K_{rf} se observa seu caráter flúvico, variando de acordo com suas camadas estratificadas e com seu baixo grau de desenvolvimento pedogenético (SiBCS, 2013).

4.2.3. Extrações com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) e oxalato ácido de amônio (OAA)

Os teores de Fe, Al e Mn extraídos pelo ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) para os solos (P1 a P11), variaram respectivamente de 33,22 a 169,99; 5,64 a 31,77; 0,03 a 1,92 g kg⁻¹ nos horizontes superficiais e de 35,26 a 164,31; 5,78 a 27,30; 0,03 a 3,32 g kg⁻¹ nos horizontes subsuperficiais (Quadro 12). Outros autores também encontraram baixos valores em solos desenvolvidos a partir de ortognaisses e granitos (Pereira & Anjos, 1999; Lani et al., 2001; Nunes et al., 2001; Pacheco, 2011) e por sedimentos da formação Barreiras (Metri et al., 2008), como para o P11.

Para os Neossolos Flúvicos (P12 a P22) de acordo com seu caráter flúvico, os teores de Fe, Al e Mn pelo DCB variaram respectivamente de 80,26 a 169,54; 14,13 a 28,09; 0,23 a 5,51 g kg⁻¹. Estes valores são semelhantes aos encontrados por Nunes (2001) avaliando um Neossolos Flúvico no rio do Carmo, afluente do rio Doce. Nos sedimentos (S1 a S12) estes variaram de 69,05 a 204,84; 12,65 a 29,32; 0,11 a 7,59 g kg⁻¹.

Na determinação do teor de Fe pelo DCB na fração argila e pela FRX na fração TFSA observou, em alguns casos, teores maiores de Fed em comparação com Fex (Quadro 12). Este fato se deve a análises de frações diferentes, ou seja, ao se analisar apenas a fração argila pode-se estar concentrando este elemento pela maior participação do Fe em formas cristalinas dos óxidos, ao contrário quando se analisa a TFSA, uma vez que nas frações mais grosseiras são encontradas quantidades extraíveis diferentes destes óxidos. De forma geral, quando os valores de Fed e Fex são próximos, pode-se inferir que existe uma menor participação de óxidos de ferro nas frações mais grosseiras ou, até mesmo, pelo fato dos minerais primários que possuem Fe já terem se intemperizado totalmente (Ker, 1988; Pacheco, 2011).

Quadro 12. Teores de Fe, Al e Mn das extrações com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), oxalato ácido de amônio (OAA) da fração argila e fluorescência de raios-X (FRX) da fração TFSA dos solos da parte alta da paisagem da bacia do rio Doce

Hor.	Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{6/}
		Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
		1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----																mol mol ⁻¹
P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico																
A	0 - 20	116,99	157,78	21,42	31,77	0,52	0,66	3,19	9,83	0,24	83,76	139,24	0,87	0,03	1,88	0,18
Bw	80 - 100	151,17	164,31	24,30	27,30	0,47	0,52	2,95	8,18	0,17	88,37	246,46	0,41	0,02	1,86	0,16
P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico																
A	0 - 20	59,15	70,75	12,84	15,44	0,23	0,27	1,34	3,91	0,17	69,34	329,24	0,82	0,02	1,02	0,21
Bw	80 - 100	62,55	73,88	14,96	18,22	0,10	0,13	0,87	4,38	0,03	72,19	377,81	0,19	0,01	1,02	0,23
P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico																
A	0 - 20	131,06	169,99	9,53	13,66	1,58	1,92	5,69	3,94	0,76	149,44	219,24	7,94	0,04	1,14	0,08
Bt	70 - 90	156,88	174,37	12,26	14,38	3,09	3,32	6,33	5,58	1,90	178,04	380,84	4,07	0,04	0,98	0,08
P4 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico																
A	0 - 20	30,40	34,09	8,98	10,02	0,06	0,07	3,48	5,23	0,04	70,84	282,74	0,10	0,11	0,48	0,20
Bt	80 - 100	68,30	75,29	9,80	11,19	0,08	0,11	2,11	4,57	0,04	71,57	289,17	0,10	0,03	1,05	0,12
P5 -Latossolo Amarelo Distrófico típico																
A	0 - 20	26,55	33,22	18,59	21,95	0,02	0,03	3,87	6,40	0,02	48,75	218,67	0,05	0,15	0,68	0,20
Bw	80 - 100	27,81	35,26	19,69	23,97	0,02	0,03	2,68	7,66	0,03	57,01	284,07	0,05	0,10	0,62	0,22
P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico																
A	0 - 20	37,66	40,34	5,22	5,64	0,31	0,33	2,60	4,63	0,17	72,10	242,87	0,94	0,07	0,56	0,04
Bt	80 - 100	45,94	48,95	5,28	5,78	0,27	0,29	1,77	3,77	0,04	106,25	316,39	0,49	0,04	0,46	0,06

Continua...

Quadro 12. Continuação...

Hor.	Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fex ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
		Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
		1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----																
mol mol ⁻¹																
P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico																
A	0 - 20	60,52	68,31	13,65	15,73	0,35	0,39	3,98	5,35	0,29	47,96	190,70	0,63	0,07	1,42	0,20
Bi	30 - 50	70,54	81,06	17,74	20,36	0,24	0,27	3,17	6,09	0,16	95,02	300,51	0,59	0,04	0,85	0,22
P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico																
A	0 - 20	80,57	92,35	7,28	9,46	0,43	0,49	2,70	3,39	0,05	47,48	155,62	0,43	0,03	1,95	0,10
Bt	80 - 100	86,04	96,20	6,89	8,85	0,48	0,53	1,65	3,21	0,04	69,68	215,84	0,46	0,02	1,38	0,09
P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico																
A	0 - 20	56,76	99,77	13,60	21,89	0,14	0,22	1,25	4,03	0,06	69,03	192,21	0,24	0,02	1,45	0,22
Bw	80 - 100	71,78	113,69	15,73	24,73	0,11	0,18	0,73	4,14	0,02	108,79	301,83	0,22	0,01	1,04	0,22
P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico																
A	0 - 20	27,14	42,25	10,22	15,08	0,04	0,09	2,53	9,21	0,02	31,52	252,13	0,11	0,09	1,34	0,19
Bw	80 - 100	25,78	41,91	7,52	11,66	0,02	0,06	1,21	6,04	0,02	37,45	293,52	0,10	0,05	1,12	0,18
P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico																
A	0 - 20	51,13	57,64	8,37	9,75	0,20	0,23	4,05	4,34	0,19	73,19	319,60	1,01	0,08	0,79	0,14
Bi	80 - 100	75,14	86,82	12,21	14,23	0,07	0,09	2,01	4,78	0,03	107,31	330,18	0,32	0,03	0,81	0,15

^{1/} DCB = extração com ditionito-citrado-bicarbonato de sódio. ^{2/} OAA = extração com oxalado ácido de amônio. ^{3/} FRX - teores pela fluorescência de raios-X. ^{4/} Fe_o/Fed = relação do teor de Fe da primeira extração com DCB e OAA. ^{5/} Fed/Fex = relação do teor de Fe da extração com DCB e determinado pela FRX. ^{6/} somatório dos teores de Fe das três extrações sucessivas com DCB. ^{7/} Substituição isomórfica de Fe³⁺ por Al³⁺ determinada pela relação molar Al/Al+Fe=[(Ald – Alo)/((Ald – Alo)+0,483(Fed – Feo))].

Ao se avaliar as curvas cumulativas de ferro, extraídos pelo DCB na fração argila dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos (Figura 12), estas apresentaram comportamento homogêneo de dissolução das formas de ferro. Observando a inclinação das curvas, estas apresentam inclinações maiores à medida que se encontram hematitas e goethitas com menor substituição isomórfica de Fe^{3+} por Al^{3+} e inclinações menores com maiores valores de substituição isomórfica (Quadro 12, 13 e 14), também constatado por Fontes (1988).

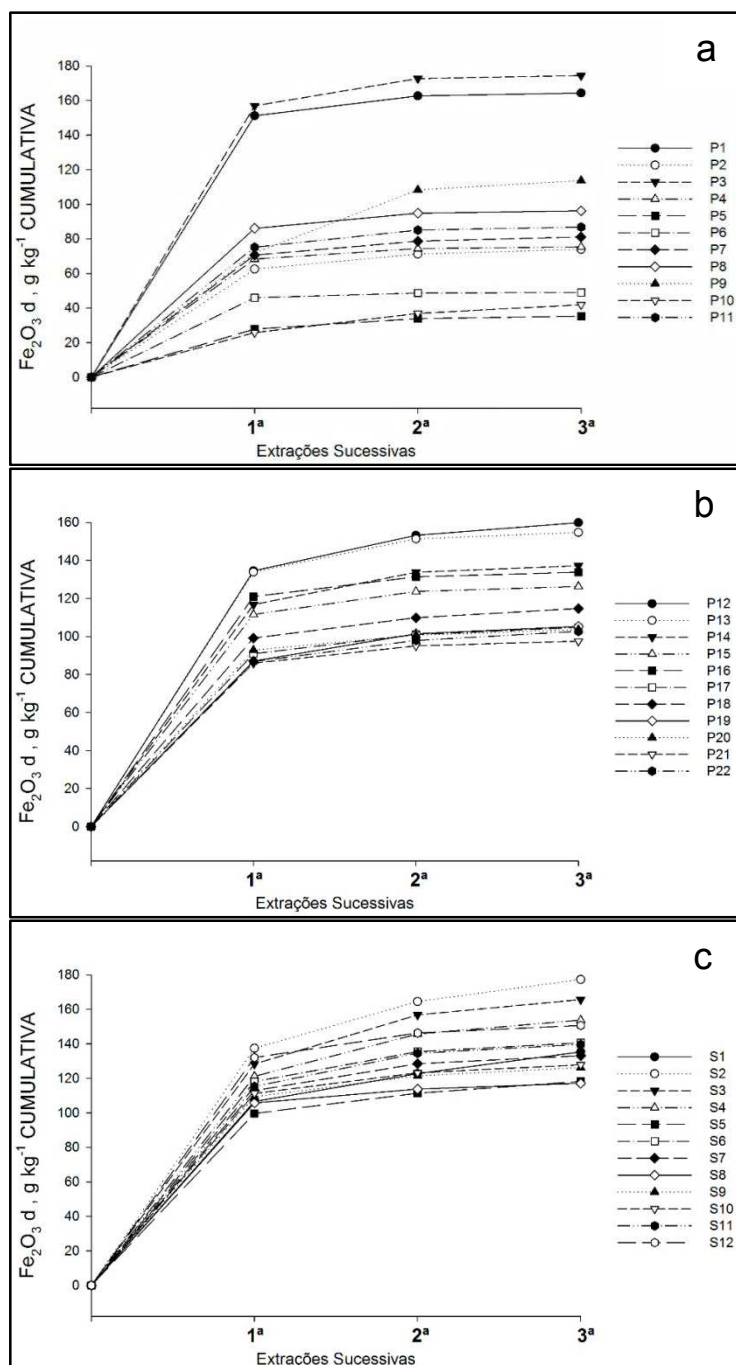


Figura 12. Teores cumulativos de Fe solubilizado em 3 extrações sucessivas com DCB na fração argila dos horizontes subsuperficiais dos solos (a), Neossolos Flúvicos (b) e em profundidade dos sedimentos (c).

Os baixos teores de Fe extraídos pelo OAA dos solos (P1 a P11) resultaram em uma baixa relação Feo/Fed, indicando a presença predominante de formas cristalinas dos óxidos de ferro, característico do elevado grau de intemperismo sofrido por estes materiais (Kampf et al., 1988; Sakurai et al., 1989; Alleoni & Camargo, 1995). Um padrão comum nos solos estudados são os maiores valores dessa relação em superfície, revelando efeito da matéria orgânica na redução da cristalinidade desses óxidos (Schwertmann, 1966; Torrent et al., 1987; Fontes, 1988). Para este fato foi encontrada correlação positiva entre a Feo/Fed e o carbono orgânico, significativos a 1 e 5% com $r=0,54$. Além disso, percebe-se que a própria matéria orgânica, presente à superfície, condiciona menor atividade de Fe^{3+} em solução e favorece a formação de goethita em detrimento à hematita (Schwertmann & Taylor, 1989).

Para os Neossolos Flúvicos e sedimentos se observa a relação Feo/Fed superiores aos encontrados para os solos da parte alta da paisagem (Quadro 13 e 14), devido aos teores elevados de FeO. Pelo maior regime de umidade desses ambientes, ocorre maior liberação de Fe dos silicatos e como também a redução destes pelos óxidos de ferro condicionando formas amorfas deste elemento (Blume & Schwertmann, 1969; Vidal-Torrado et al., 1999; Silva, 2001; Ghidin, et al., 2006).

A substituição isomórfica de Fe^{3+} por Al^{3+} foi determinada pela relação molar, de acordo com Schwertmann & Carlson (1994). De acordo com Schwertmann & Cornell (1991) o máximo de substituição suportada seria de 0,33 mol mol⁻¹ para a goethita e de 0,16 mol mol⁻¹ para a hematita, ambos em sistemas puros. Assim, avaliando os valores de substituição isomórfica nos solos (Quadro 12), estes variaram de 0,04 a 0,18 mol mol⁻¹ para os solos com matizes 10R a 2,5YR (P1, P3, P4, P6 e P8) e de 0,14 a 0,23 mol mol⁻¹ para os solos com matizes de 5YR a 10YR (P2, P5, P7, P9, P10 e P11). Valores estes corroborados por estudos realizados em solos de regiões tropicais e subtropicais (Curi & Franzmeier, 1987; Fontes & Weed, 1991; Ker, 1995; Muggler et al., 2001; Inda Júnior & Kampf, 2005). Alguns valores estão superiores ao máximo suportado por goethitas e hematitas, pelo fato de não serem sistemas puros e sim diferentes proporções desses óxidos (Cornell & Schwertmann, 2003), como é o caso do Latossolo Vermelho (P1) que apresentou valor de substituição isomórfica de 0,18 mol mol⁻¹ no horizonte superficial.

Quadro 13. Teores de Fe, Al e Mn das extrações com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), oxalato ácido de amônio (OAA) da fração argila e fluorescência de raios-X (FRX) da TFSA dos Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce

Hor.	Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
		Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
		1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----																
P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico																
A	0 - 10	119,88	137,49	15,04	20,90	3,82	4,01	27,03	14,74	2,50	113,94	184,92	1,98	0,23	1,21	0,08
C2	20 - 33	123,28	139,31	16,44	21,73	1,02	1,07	23,22	9,10	0,99	118,16	275,94	2,10	0,19	1,18	0,15
C4	40 - 55	134,49	159,83	16,28	24,57	4,60	4,86	35,30	12,37	5,62	137,07	197,88	2,76	0,26	1,17	0,13
C8	120 - 180+	148,95	169,54	19,53	26,75	3,56	3,75	34,52	15,62	3,23	127,73	240,79	2,31	0,23	1,33	0,11
P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico																
A	0 - 10	126,21	153,88	15,36	24,53	1,31	1,39	22,51	4,08	1,18	72,47	109,66	1,02	0,18	2,12	0,20
C2	10 - 70	145,54	166,40	20,50	28,09	5,26	5,51	34,45	10,05	4,91	53,71	124,29	1,07	0,24	3,10	0,18
C5	81 - 112	133,84	154,70	17,12	24,40	2,49	2,62	15,34	4,11	1,66	121,66	267,62	3,23	0,11	1,27	0,19
C9	132 - 141+	121,79	143,04	17,95	24,89	2,60	2,73	17,22	9,60	2,14	134,79	293,90	2,75	0,14	1,06	0,16
P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico																
A	0 - 4	127,09	140,22	16,53	20,97	0,58	0,60	10,82	3,15	0,16	170,74	273,11	1,69	0,09	0,82	0,18
C1	4 - 24	143,05	163,37	16,62	22,92	2,84	2,95	18,81	3,63	1,99	210,35	221,70	3,84	0,13	0,78	0,17
C3	36 - 80	116,72	137,12	14,13	20,78	0,80	0,86	13,12	3,60	0,30	162,16	358,91	2,14	0,11	0,85	0,18
Cg	110 - 120	115,65	133,05	14,18	20,61	0,45	0,48	22,32	4,49	0,33	105,12	223,78	2,15	0,19	1,27	0,19
P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico																
A	0 - 10	124,13	144,13	16,13	23,36	2,19	2,30	16,51	4,03	1,74	87,23	229,45	1,22	0,13	1,65	0,19
C4	105 - 120	111,55	126,27	16,20	21,70	0,51	0,55	14,13	3,40	0,32	121,04	313,93	2,30	0,13	1,04	0,20
C7	140 - 170	117,08	133,67	15,86	21,73	1,20	1,26	21,73	3,66	0,94	110,31	263,47	1,80	0,19	1,21	0,20

Continua...

Quadro 13. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
		Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
		1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----																mol mol ⁻¹
P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																
A	0 - 8	110,89	126,34	16,14	20,95	0,77	0,81	13,27	3,86	0,65	60,72	194,10	0,73	0,12	2,08	0,19
C2	28 - 59	120,92	133,75	21,33	26,44	0,97	1,02	12,02	7,06	0,90	68,03	294,08	0,86	0,10	1,97	0,20
C6	130 - 160+	101,07	113,13	14,51	18,55	0,46	0,50	11,34	4,22	0,39	97,10	266,30	1,73	0,11	1,17	0,18
P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																
A	0 - 18	99,44	114,15	14,79	20,14	0,79	0,84	16,20	5,37	0,74	76,45	242,30	1,14	0,16	1,49	0,19
C3	40 - 61	90,93	104,68	11,89	16,71	0,96	1,02	12,50	4,50	0,92	97,01	228,88	1,40	0,14	1,08	0,17
C7	117 - 135	98,81	111,52	13,51	17,52	1,46	1,54	13,62	3,91	1,51	143,72	295,41	2,87	0,14	0,78	0,18
P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																
A	0 - 15	96,54	109,60	11,67	15,88	1,56	1,63	16,88	3,94	1,44	46,95	157,89	0,70	0,17	2,33	0,17
C2	30 - 57	99,16	114,64	13,62	18,39	1,09	1,15	8,38	4,38	0,84	47,35	181,16	0,79	0,08	2,42	0,17
C4	74 - 120+	104,98	122,32	12,93	17,91	0,82	0,89	5,18	3,49	0,63	35,64	161,82	0,47	0,05	3,43	0,16
P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																
A	0 - 10	86,39	100,74	11,25	16,38	0,65	0,68	17,60	3,64	0,55	54,50	205,63	0,82	0,20	1,85	0,19
C1	10 - 22	99,28	113,02	13,18	18,48	0,37	0,39	14,11	3,64	0,23	115,54	302,59	2,62	0,14	0,98	0,19
C4	50 - 70	87,04	105,28	11,19	17,16	0,50	0,54	15,86	3,31	0,32	88,93	256,85	1,59	0,18	1,18	0,20
C7	135 - 145+	107,46	120,96	15,55	21,42	1,18	1,23	6,51	4,19	0,64	89,03	275,94	1,09	0,06	1,36	0,19
P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																
A	0 - 5	66,29	80,26	9,14	14,13	0,34	0,37	15,70	3,68	0,27	98,93	243,24	1,62	0,24	0,81	0,20
C2	40 - 60	92,82	103,55	14,32	18,20	0,88	0,92	13,54	4,90	0,71	104,23	335,85	1,58	0,15	0,99	0,19
C5	103 - 150+	90,63	103,14	12,23	16,38	1,22	1,28	11,71	3,86	0,90	96,32	239,46	1,79	0,13	1,07	0,18

Continua...

Quadro 13. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
		Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
		1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
		----- g kg ⁻¹ -----														
P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico																
A	0 - 13	88,94	105,66	10,71	15,93	0,77	0,82	14,92	2,76	0,63	57,89	184,26	0,68	0,17	1,83	0,19
C4	37 - 55	85,93	97,50	14,61	18,78	0,80	0,84	11,96	5,54	0,60	92,22	219,43	1,33	0,14	1,06	0,20
C8	150 - 175+	125,27	137,29	19,05	22,85	0,21	0,23	3,61	3,22	0,04	91,32	296,54	0,41	0,03	1,50	0,19
P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico																
A	0 - 25	103,06	118,99	12,40	17,80	0,75	0,80	4,31	4,26	0,58	43,70	145,61	0,50	0,04	2,72	0,16
C2	33 - 52	86,74	102,67	12,52	17,93	0,62	0,66	13,81	4,06	0,44	105,38	292,76	1,51	0,16	0,97	0,20
C5	130 - 140+	153,46	168,29	18,71	23,74	1,04	1,28	10,24	6,55	0,71	45,00	150,22	0,34	0,07	3,74	0,15

^{1/} DCB = extração com ditionito-citrado-bicarbonato de sódio. ^{2/} OAA = extração com oxalado ácido de amônio. ^{3/} FRX - teores pela fluorescência de raios-X. ^{4/} Fe_o/Fe_d = relação do teor de Fe da primeira extração com DCB e OAA. ^{5/} Fe_d/Fe_x = relação do teor de Fe da extração com DCB e determinado pela FRX. ^{6/} somatório dos teores de Fe das três extrações sucessivas com DCB. ^{7/} Substituição isomórfica de Fe³⁺ por Al³⁺ determinada pela relação molar Al/(Al+Fe)=[(Ald - Alo)/((Ald - Alo)+0,483(Fed - Feo))].

Quadro 14. Teores de Fe, Al e Mn das extrações com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), oxalato ácido de amônio (OAA) da fração argila e fluorescência de raios-X (FRX) da TFSA dos sedimentos fluviais das margens esquerda e direita do rio Doce

Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----															
S1 - Foz do Rio Piranga															
Margem Direita															
0-10	107,43	135,67	13,69	21,78	0,33	0,40	46,15	13,87	0,14	48,76	181,63	0,54	0,43	2,78	0,12
20-30	106,59	135,34	14,30	22,20	0,32	0,39	45,57	8,10	0,08	56,04	202,42	0,64	0,43	2,41	0,20
S2 - Foz do Rio Carmo															
Margem Esquerda															
0-10	137,41	177,25	11,63	21,83	0,91	1,80	46,25	15,77	4,09	175,46	77,68	2,51	0,34	1,01	0,07
S3 - Nascente do Rio Doce															
Margem Esquerda															
0-10	138,93	174,37	18,91	28,20	0,79	0,94	50,64	11,30	0,26	152,72	162,65	0,91	0,36	1,14	0,18
20-30	128,27	165,61	9,74	18,88	1,29	1,45	45,92	10,85	0,22	60,98	152,03	0,67	0,36	2,72	0,10
Margem Direita															
0-10	128,55	159,89	8,25	16,92	0,38	0,54	45,83	7,52	0,65	78,24	163,14	1,40	0,36	2,04	0,11
S4 - Foz do Rio Casca															
Margem Direita (Antes)															
0-10	145,06	184,93	13,65	24,72	0,57	0,69	61,52	8,40	0,17	121,62	241,16	1,28	0,42	1,52	0,17
20-30	121,14	153,75	12,71	20,40	0,00	0,11	43,81	8,89	0,07	149,15	286,34	1,17	0,36	1,03	0,14

Continua...

Quadro 14. Continuação ...

Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----															
S5 - Ipatinga (MG)															
Margem Direita (Antes)															
0-10	99,62	118,21	15,36	21,51	0,29	0,33	14,74	7,05	0,13	111,15	281,42	1,00	0,15	1,06	0,18
25-40	93,69	109,65	17,29	23,60	0,69	0,72	38,47	6,55	0,08	89,80	364,20	0,65	0,41	1,22	0,27
Margem Esquerda (Depois)															
0-13	104,63	124,69	14,08	20,53	0,94	0,98	33,47	8,03	0,15	127,66	346,63	2,83	0,32	0,98	0,18
Margem Direita (Depois)															
0-15	127,50	152,67	15,83	23,51	0,53	0,58	39,61	8,79	0,18	93,92	272,16	1,66	0,31	1,63	0,17
30-45	105,06	127,08	22,06	29,32	0,53	0,57	35,78	7,50	0,09	106,64	289,36	2,04	0,34	1,19	0,27
S6 - Naque (MG) - Foz Rio Santo Antonio															
Margem Esquerda (Antes)															
0-10	118,07	140,55	15,11	22,10	1,36	1,42	32,55	7,03	0,39	117,13	196,94	0,85	0,28	1,20	0,18
20-30	115,03	141,25	13,64	22,66	0,41	0,50	48,62	8,75	0,42	84,08	227,18	1,16	0,42	1,68	0,19
Margem Direita (Antes)															
0-12	110,89	133,31	20,13	28,05	0,79	0,83	35,53	5,87	0,09	126,35	272,35	2,06	0,32	1,06	0,26
12-25	114,39	138,60	11,86	19,37	0,73	0,79	33,88	12,07	0,17	115,20	310,15	1,55	0,30	1,20	0,10
Margem Esquerda (Depois)															
0-12	115,63	138,47	16,70	23,88	1,12	1,18	31,64	13,83	0,21	61,20	225,10	0,76	0,27	2,26	0,13
23-35	105,05	124,19	12,97	18,91	1,61	1,68	19,12	13,74	0,25	45,66	136,68	0,48	0,18	2,72	0,07
Margem Direita (Depois)															
0-10	104,45	132,30	14,28	22,72	0,58	0,78	39,54	7,58	0,40	68,01	183,07	0,97	0,38	1,95	0,20
10-20	119,12	139,94	13,59	19,52	0,73	0,78	30,07	5,36	0,12	89,76	259,69	1,22	0,25	1,56	0,17

Continua...

Quadro 14. Continuação

Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂						
	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----															
S7 - Governador Valadares (MG)															
Margem Esquerda (Antes)															
0-10	111,95	137,88	14,68	22,57	2,84	3,00	21,15	10,30	1,36	35,98	80,15	0,30	0,19	3,83	0,14
10-20	112,88	133,08	16,18	23,34	0,83	0,89	18,81	7,65	0,10	57,57	165,20	0,48	0,17	2,31	0,18
Margem Direita (Antes)															
0-15	92,20	110,81	13,86	19,75	0,36	0,39	29,58	5,36	0,07	110,08	256,28	1,87	0,32	1,01	0,22
30-45	91,41	109,52	12,62	18,21	0,40	0,43	23,30	8,75	0,08	118,42	299,57	2,07	0,25	0,92	0,15
Margem Esquerda (Depois)															
0-12	100,25	116,38	14,00	19,85	1,15	1,22	21,52	6,22	0,75	38,08	128,60	0,50	0,21	3,06	0,18
24-36	116,11	133,65	18,82	25,60	2,26	2,40	19,48	8,62	3,30	38,07	126,03	0,48	0,17	3,51	0,19
Margem Direita (Depois)															
0-10	60,77	74,71	16,39	21,78	0,32	0,35	21,20	6,37	0,10	76,26	268,95	0,63	0,35	0,98	0,31
20-30	50,45	69,05	14,14	20,37	0,27	0,30	16,52	7,46	0,04	46,69	226,80	0,54	0,33	1,48	0,28
S8 - Resplendor (MG)															
Margem Esquerda (Antes)															
0-13	82,84	110,10	7,69	14,48	0,45	0,50	29,76	7,36	0,52	75,79	192,21	0,66	0,36	1,45	0,12
13-26	105,74	117,12	14,63	18,22	0,36	0,38	36,24	5,14	0,43	101,92	322,81	1,10	0,34	1,15	0,20
Margem Direita (Antes)															
0-12	118,14	138,67	11,96	18,08	0,60	0,66	42,32	6,21	0,69	43,69	170,59	0,52	0,36	3,17	0,16
24-36	87,83	101,35	11,46	16,13	0,40	0,44	28,71	6,04	0,27	70,18	188,06	0,71	0,33	1,44	0,18
Margem Esquerda (Depois)															
0-17	85,03	121,72	7,97	17,01	1,06	1,29	38,87	6,31	1,25	62,42	212,63	0,91	0,46	1,95	0,17
17-34	84,95	104,57	9,05	15,34	0,74	0,81	24,30	6,21	0,74	43,77	118,28	0,42	0,29	2,39	0,15
Margem Direita (Depois)															
0-10	84,09	96,20	10,60	14,74	0,21	0,23	17,53	7,40	0,18	69,78	282,18	1,09	0,21	1,38	0,13

Continua...

Quadro 14. Continuação ...

Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fe _x ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂			
	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----															
S9 - Baixo Guandu (ES)															
Margem Esquerda (Depois)															
0-11	109,31	126,19	12,16	17,87	2,37	2,50	23,46	4,42	1,55	46,43	141,20	0,76	0,21	2,72	0,17
24-36	101,93	119,93	11,79	17,49	2,48	2,62	28,04	5,38	2,70	28,79	110,05	0,50	0,28	4,17	0,17
Margem Direita (Depois)															
0-15	88,65	105,62	9,40	14,62	0,29	0,31	30,64	4,54	0,63	29,54	177,96	0,35	0,35	3,58	0,17
24-35	77,13	96,99	7,11	12,65	0,25	0,28	33,64	5,21	0,22	35,32	171,54	0,45	0,44	2,75	0,16
S10 - Colatina (ES)															
Margem Esquerda (Antes)															
0-15	111,16	127,80	11,48	16,93	1,15	1,22	41,13	10,67	1,23	83,60	273,48	1,69	0,37	1,53	0,10
15-30	110,76	133,77	9,77	16,87	0,85	0,92	45,45	12,65	0,81	51,79	186,85	0,79	0,41	2,58	0,07
Margem Direita (Antes)															
0-15	90,66	103,64	10,80	15,40	0,30	0,32	21,67	4,26	0,21	107,62	269,89	1,54	0,24	0,96	0,18
15-30	88,95	104,44	10,93	15,96	0,47	0,51	30,16	6,52	0,42	86,76	233,79	1,14	0,34	1,20	0,17
Margem Esquerda (Depois)															
0-30	94,74	108,05	11,59	15,92	0,47	0,50	23,59	7,73	0,47	80,67	229,07	1,22	0,25	1,34	0,13
Margem Direita (Depois)															
0-15	165,13	204,84	7,25	14,06	7,14	7,59	22,67	8,23	0,46	12,72	42,43	0,43	0,14	16,10	0,05

Continua...

Quadro 14. Continuação ...

Prof. (cm)	DCB ^{1/}						OAA ^{2/}			FRX ^{3/}			Fe _o /Fe _d ^{4/}	Fe _d /Fex ^{5/}	Al/Al+Fe ^{7/}
	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		MnO ₂		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂						
	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}	1 ^a	Σ ^{6/}									
----- g kg ⁻¹ -----															
S11 - Linhares (ES)															
Margem Esquerda (Antes)															
0-30	64,24	73,37	4,15	8,95	0,48	0,52	11,50	7,06	0,56	25,15	79,06	0,28	0,18	2,92	0,05
Margem Direita (Antes)															
0-17	115,25	139,60	12,20	22,86	3,23	3,42	23,00	18,96	4,19	25,97	86,90	0,61	0,20	5,38	0,05
17-20	98,75	115,66	9,95	14,85	0,74	0,79	28,02	7,36	0,70	58,30	229,07	0,90	0,28	1,98	0,12
Margem Esquerda (Depois)															
0-14	102,01	121,75	10,10	15,98	0,71	0,76	25,41	11,52	0,95	56,60	184,60	0,76	0,25	2,15	0,07
14-33	84,90	102,15	9,19	15,08	0,54	0,59	19,82	9,16	0,51	96,55	250,24	1,43	0,23	1,06	0,10
Margem Direita (Depois)															
0-17	98,83	113,01	12,77	16,80	0,71	0,76	8,38	8,88	0,74	60,57	229,45	0,72	0,08	1,87	0,11
17-28	89,36	102,66	29,14	46,64	0,73	0,75	39,17	33,70	0,39	48,72	204,88	0,58	0,44	2,11	0,24
S12 - Regência (ES)															
Margem Esquerda (Depois)															
0-22	98,56	114,41	12,62	17,65	0,58	0,62	25,83	6,26	0,57	63,82	240,79	0,81	0,26	1,79	0,17
22-33	131,98	150,60	12,86	18,16	0,78	0,85	26,93	9,39	0,49	16,17	31,22	0,18	0,20	9,31	0,10
Margem Direita (Depois)															
0-19	89,85	108,51	9,74	16,23	1,45	1,54	25,16	8,30	1,38	49,79	180,87	1,05	0,28	2,18	0,13
19-32	82,74	107,74	18,51	30,18	0,77	0,87	38,67	25,72	1,06	70,50	225,29	1,40	0,47	1,53	0,09

^{1/} DCB = extração com ditionito-citrado-bicarbonato de sódio. ^{2/} OAA = extração com oxalado ácido de amônio. ^{3/} FRX - teores pela fluorescência de raios-X. ^{4/} Fe_o/Fed = relação do teor de Fe da primeira extração com DCB e OAA. ^{5/} Fed/Fex = relação do teor de Fe da extração com DCB e determinado pela FRX. ^{6/} somatório dos teores de Fe das três extrações sucessivas com DCB. ^{7/} Substituição isomórfica de Fe³⁺ por Al³⁺ determinada pela relação molar Al/Al+Fe=[(Ald - Alo)/((Ald - Alo)+0,483(Fed - Feo))].

Para os Neossolos Flúvicos e sedimentos os valores da substituição isomórfica variaram de 0,14 a 0,23 mol mol⁻¹, indicando um grau de substituição menor se comparados com alguns solos, principalmente os de matizes 5YR ou mais amarelos, uma vez que nos Neossolos Flúvicos e sedimentos predominam a cor 7,5YR pelo fator de umidade favorecendo a formação da goethita (Mitchell et al, 1964).

4.3. Teores totais de metais pesados pela fluorescência de raios-X

Os teores totais de metais pesados dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos da bacia do rio Doce foram determinados pela fluorescência de raios-X (FRX) (Quadro 16, 17 e 18) sendo que os teores de V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba e Pb dos solos foram utilizados na definição do valor do fundo geoquímico natural (Quadro 15) para a bacia em estudo. É imprescindível aos órgãos públicos ambientais fiscalizadores conhecer o valor do fundo geoquímico natural desses elementos nos solos, para fins de definição, por exemplo, se uma determinada contaminação diagnosticada foi proporcionada por empreendimentos nas proximidades ou pela riqueza natural dos solos da região.

Para a determinação dos valores do fundo geoquímico natural utilizou-se os teores de metais pesados da profundidade de 80 a 100 cm dos solos coletados, sem influência de atividade antrópica da bacia do rio Doce (Quadro 16). Foi calculado o quartil 75 %, percentil 90 % e percentil 95 % (Quadro 15). Para Martinez-Lladó et al. (2008) e Matschullat et al. (2000), o fundo geoquímico natural é definido como a medida de tendência central da concentração dos elementos, em solos sem intervenção antrópica, enquanto que valores de referência, é a concentração extrema de certo elemento naturalmente encontrado nos solos. Desta forma, foi utilizado o quartil 75 % dos teores de metais pesados (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba e Pb) da bacia em estudo como o valor de fundo geoquímico natural.

Para o estabelecimento dos valores de referência de qualidade do solo a resolução CONAMA 420 (2009) definiu com base em análises de risco a saúde pública e ao meio ambiente, os valores de prevenção (VP) e valor de investigação (VI) dos teores de metais pesados em solos (Quadro 15) para o território brasileiro e atribuiu a definição do Valor de Referência de Qualidade

(VRQs) aos estados. Assim, de acordo com o COPAM (2011) foi estabelecido os VRQs para o Estado de Minas Gerais (Quadro 15) utilizando-se o método de extração semi-total EPA 3051a. Por definição, VRQ seria a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo e VP a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais (CONAMA, 2009).

Quadro 15. Valores do Quartil 75 %, Percentil 90 % e Percentil 95 % das profundidades de 0 – 20 e 80 – 100 cm dos solos da bacia do rio Doce; Valor de referência de qualidade - VRQs; Valor de prevenção – VPs

Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Pb
----- µg g-1 -----												
Quartil 75 %^{1/}												
0 - 20	134,5	117,7	24,7	44,7	28,8	68,0	2,6	1,4	2,2	3,0	194,6	29,6
80 - 100	163,4	152,2	18,6	66,9	28,2	62,5	1,8	0,6	2,3	2,8	177,6	41,1
Percentil 90 %^{1/}												
0 - 20	147,7	144,0	36,5	73,9	32,2	86,3	27,2	1,8	2,6	3,1	392,1	44,9
80 - 100	202,2	161,5	38,4	83,7	46,2	94,9	3,4	0,7	2,8	3,0	421,2	53,6
Percentil 95%^{1/}												
0 - 20	155,0	150,0	43,8	78,2	33,8	96,6	50,4	1,8	2,8	3,1	489,4	51,4
80 - 100	214,0	163,6	46,4	95,4	48,7	97,6	4,7	0,7	3,0	3,1	469,8	54,1
COPAM (2011)^{2/}												
Valor de Referência de Qualidade – VRQs – Minas Gerais												
0 - 20	129,0	75,0	6,0	21,5	49,0	46,5	0,5	0,5	0,9	0,4	93,0	19,5
CONAMA (2009)^{3/}												
Valor de Prevenção - VP												
0 - 20	129,0	75,0	25,0	30,0	60,0	300,0	15,0	5,0	30,0	1,3	150,0	72,0
Valor de Investigação - VI												
Agrícola												
0 - 20	-	150	35	70	200	450	35	-	50	3	300	180
Residencial												
0 - 20	-	300	65	100	400	1000	55	-	100	8	500	300
Industrial												
0 - 20	-	400	90	130	600	2000	150	-	120	20	750	900
Teores Médios de Metais Pesados em Rochas^{4/}												
Rocha	79,9	54,8	12,1	10,1	11,0	59,2	0,5	0,5	0,6	0,1	752,0	25,8

^{1/}Determinados com os teores de metais pela fluorescência de raios-X nos solos do presente estudo; ^{2/}Deliberação Normativa COPAM nº 166, 2011 - valores de referência de qualidade para os solos de Minas Gerais; ^{3/}Resolução CONAMA nº 420, 2009 – valores determinados com base em análises de risco; ^{4/}Análise geoquímica de rochas representativas da Bacia do rio Doce baseados na literatura (Bilal et al., 2000; Oliveira, 2002; Gonçalves, 2009; Uhlein, 2014).

Quadro 16. Teores de metais pesados para os solos sem influência antrópica da bacia do rio Doce

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico														
A	0 - 20	140,30	69,40	11,00	44,10	28,80	33,70	n.d	n.d	1,30	2,60	52,50	n.d	26,30
Bw	80 - 100	121,40	30,10	46,40	42,20	25,20	62,50	n.d	n.d	2,30	2,40	533,30	n.d	56,30
P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico														
A	0 - 20	155,00	117,70	16,70	78,20	33,80	56,30	n.d	1,80	2,30	2,70	149,80	n.d	38,40
Bw	80 - 100	190,40	152,20	14,10	95,40	48,70	56,40	n.d	n.d	1,70	2,70	177,60	n.d	53,10
P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico														
A	0 - 20	349,60	388,10	69,90	199,50	120,70	165,50	n.d	n.d	1,90	3,00	202,30	n.d	12,40
Bt	70 - 90	375,20	380,70	66,20	169,40	101,10	92,20	n.d	n.d	0,70	2,30	62,00	n.d	10,20
P4 - Argissolo Vermelho Distrófico típico														
A	0 - 20	91,10	150,00	10,00	44,70	14,70	52,90	n.d	n.d	1,60	3,00	n.d	n.d	20,70
Bt	80 - 100	99,20	159,40	10,00	47,40	16,70	20,50	n.d	n.d	1,80	3,10	n.d	n.d	21,90
P5 - Latossolo Amarelo Distrófico típico														
A	0 - 20	63,30	138,00	13,40	40,50	7,90	23,80	n.d	0,80	2,80	3,10	n.d	n.d	15,90
Bw	80 - 100	74,10	163,60	10,00	42,00	10,30	16,50	n.d	0,70	3,00	3,20	n.d	n.d	11,60
P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico														
A	0 - 20	96,50	26,60	43,80	21,80	8,40	51,80	n.d	0,50	1,70	2,90	194,60	n.d	29,60
Bt	80 - 100	138,50	35,00	18,60	20,40	6,20	55,90	n.d	n.d	0,40	2,50	69,10	n.d	41,10

Continua....

Quadro 16. Continuação...

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico														
A	0 - 20	77,00	68,80	24,70	42,30	15,90	76,00	50,40	n.d	1,30	2,80	294,80	n.d	23,30
Bi	30 - 50	145,20	111,60	16,10	66,90	22,60	97,60	119,10	n.d	1,10	2,70	469,80	n.d	29,30
P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico														
A	0 - 20	90,60	38,30	10,50	26,80	8,60	26,50	4,00	0,90	2,20	2,70	n.d	n.d	9,70
Bt	80 - 100	124,90	42,70	11,00	31,10	11,20	41,90	2,00	n.d	2,10	2,20	n.d	n.d	17,80
P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico														
A	0 - 20	134,50	92,00	14,90	30,80	15,80	68,00	0,80	1,40	1,80	3,00	n.d	n.d	19,40
Bw	80 - 100	214,00	106,30	12,00	35,30	28,20	48,10	1,80	0,90	3,10	2,80	n.d	n.d	25,20
P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico														
A	0 - 20	129,10	77,00	10,00	37,80	15,60	37,80	2,60	1,10	2,10	2,30	n.d	n.d	22,20
Bw	80 - 100	163,40	112,00	3,00	42,10	11,60	37,20	4,70	0,60	2,50	2,80	n.d	n.d	22,30
P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico														
A	0 - 20	119,50	103,40	29,20	69,50	30,50	96,60	n.d	1,00	1,50	2,70	489,40	n.d	51,40
Bi	80 - 100	160,00	108,00	30,40	71,90	43,60	102,00	1,50	n.d	1,00	2,80	372,50	n.d	54,10

Continua....

Quadro 17. Teores de metais pesados para os Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce.

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico														
A	0 - 10	54,80	93,40	14,00	58,40	20,30	48,10	32,70	n.d	1,50	2,20	485,90	n.d	21,70
C1	10 - 20	55,40	98,40	21,50	66,00	25,90	54,10	31,10	n.d	1,80	2,70	525,00	n.d	20,10
C2	20 - 33	100,90	123,00	3,00	74,40	30,80	70,70	25,20	n.d	1,90	2,60	570,80	n.d	24,30
C3	33 - 40	77,90	131,70	39,80	74,00	31,70	62,30	43,10	n.d	1,50	2,10	479,10	n.d	22,20
C4	40 - 55	60,70	98,80	3,00	55,60	21,90	45,60	56,50	n.d	2,00	2,20	461,30	n.d	19,10
C5	55 - 65	58,10	91,90	14,00	57,40	24,90	40,00	53,10	n.d	2,10	2,30	563,00	n.d	16,80
C6	65 - 90	89,30	148,80	29,50	74,00	26,40	51,90	78,30	n.d	1,80	2,10	611,20	n.d	24,80
C7	90 - 120	108,60	141,70	19,30	79,60	54,70	66,00	163,30	n.d	1,80	2,70	582,10	n.d	28,60
C8	120 - 180+	82,20	135,70	14,00	71,90	28,70	46,00	206,50	n.d	2,10	2,60	532,40	n.d	23,00
P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico														
A	0 - 10	31,30	57,50	13,80	37,80	13,30	33,80	20,50	n.d	1,30	2,20	381,30	n.d	14,10
C1	4 - 20	66,90	99,00	29,70	64,90	24,60	59,50	24,60	n.d	1,30	2,80	532,10	n.d	19,70
C2	10 - 70	36,20	58,50	11,00	43,40	15,80	36,80	19,40	n.d	1,50	2,40	498,20	n.d	13,40
C3	70 - 84	77,90	130,40	2,00	69,80	25,60	71,10	37,40	n.d	1,70	2,40	598,40	n.d	24,30
C4	71 - 95	44,70	79,50	2,00	43,90	14,40	44,60	31,70	n.d	1,40	2,80	453,80	n.d	16,90
C5	81 - 112	100,60	133,80	12,00	80,30	32,20	74,70	39,40	n.d	1,40	2,60	634,90	n.d	30,80
C6	102 - 122	60,10	89,80	3,00	57,00	26,70	48,50	29,50	n.d	2,10	2,40	556,30	n.d	20,90
C7	109 - 133	99,30	130,70	31,30	86,10	40,10	74,50	30,90	n.d	2,10	2,90	653,60	n.d	31,00
C8	118 - 141	58,50	78,00	13,30	57,70	23,60	51,70	18,90	n.d	1,60	2,40	591,10	n.d	22,20
C9	132 - 141+	100,00	128,70	15,40	75,30	32,30	69,10	25,60	n.d	2,00	2,60	621,10	n.d	33,80

Continua....

Quadro 17. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico														
A	0 - 4	175,90	143,70	26,30	112,80	57,90	91,10	31,00	n.d	2,20	2,70	560,60	n.d	43,90
C1	4 - 24	118,90	125,40	26,00	93,10	36,70	78,70	28,60	n.d	2,30	3,60	623,20	n.d	37,70
C2	24 - 36	208,60	161,70	29,10	123,60	59,80	94,80	21,60	n.d	2,00	3,10	324,30	n.d	55,20
C3	36 - 80	153,90	141,00	30,30	91,60	45,80	77,80	30,80	n.d	1,90	2,60	515,80	n.d	41,70
C4	80 - 110	14,50	34,80	3,00	23,10	5,10	12,70	19,90	n.d	0,60	2,50	250,70	n.d	6,50
Cg	110 - 120	107,10	135,70	17,70	80,80	31,20	77,10	32,60	n.d	2,40	3,20	654,40	n.d	28,80
P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico														
A	0 - 10	56,40	101,00	12,40	63,30	23,00	72,00	12,40	n.d	2,30	2,20	617,80	n.d	29,70
C1	10 - 45	34,30	61,20	12,00	44,10	11,50	54,80	10,30	n.d	1,20	2,50	486,00	n.d	21,80
C2	45 - 87	75,80	109,60	11,70	67,90	24,00	84,20	14,80	n.d	3,00	2,30	671,70	n.d	28,10
C3	87 - 105	29,50	58,50	16,30	41,80	13,20	51,10	11,00	n.d	n.d	2,40	547,20	n.d	20,60
C4	105 - 120	127,90	127,50	16,80	86,20	45,10	106,40	13,10	n.d	3,40	3,20	534,90	n.d	42,30
C5	120 - 130	64,40	91,70	23,60	66,80	26,90	92,20	11,30	n.d	1,60	2,60	628,60	n.d	34,60
C6	130 - 140	21,00	56,50	14,20	38,80	10,60	43,00	11,40	n.d	2,40	2,60	524,50	n.d	17,30
C7	140 - 170	103,90	121,70	12,70	79,60	34,00	107,90	14,70	n.d	1,40	2,90	662,00	n.d	40,00

Continua....

Quadro 17. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico														
A	0 - 8	40,20	65,30	12,00	39,90	10,70	52,30	4,60	n.d	2,70	2,50	500,40	n.d	28,00
C1	8 - 28	55,50	69,50	16,60	48,20	16,60	66,10	2,20	n.d	2,40	2,40	607,10	n.d	35,50
C2	28 - 59	57,00	88,40	22,50	67,70	26,80	67,20	4,70	n.d	20,10	3,00	550,70	n.d	34,30
C3	59 - 70	20,20	36,50	12,00	31,70	8,00	40,10	6,40	n.d	n.d	2,70	485,10	n.d	23,10
C4	70 - 105	30,90	40,00	11,00	33,10	10,90	37,90	4,60	n.d	2,50	3,00	483,60	n.d	26,80
C5	105 - 130	27,90	41,40	11,30	29,30	7,90	38,40	3,60	n.d	1,70	2,20	416,20	n.d	25,50
C6	130 - 160+	127,70	119,60	37,00	63,70	37,50	91,20	24,10	n.d	2,00	2,70	464,10	n.d	53,00
P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico														
A	0 - 18	66,90	78,30	15,80	55,10	20,10	77,10	3,40	n.d	3,20	2,90	782,70	n.d	31,40
C1	18 - 22	143,40	117,40	12,50	73,50	37,90	128,90	2,70	n.d	0,00	3,00	689,50	n.d	36,50
C2	22 - 40	95,20	103,20	12,00	67,20	30,30	109,50	8,40	n.d	3,00	2,80	685,00	n.d	45,40
C3	40 - 61	85,10	99,30	12,00	60,40	23,90	134,80	5,10	n.d	2,30	3,10	763,90	n.d	43,00
C4	61 - 85	118,20	102,00	15,10	69,50	31,40	101,90	7,00	n.d	1,10	2,80	730,60	n.d	40,70
C5	85 - 108	71,40	78,60	17,10	57,60	26,80	77,80	3,90	n.d	2,20	3,00	753,70	n.d	37,50
C6	108 - 117	172,30	126,70	23,70	80,50	51,20	131,00	4,50	n.d	1,80	2,50	590,40	n.d	47,50
C7	117 - 135	152,30	134,50	19,30	88,20	52,80	106,90	12,60	n.d	3,00	3,30	559,50	n.d	54,70

Continua....

Quadro 17. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico														
A	0 - 15	35,90	54,30	11,00	35,60	12,50	40,40	8,80	n.d	1,60	2,30	466,60	n.d	18,50
AC	15 - 20	68,60	82,40	15,60	57,60	25,10	69,20	15,50	n.d	2,00	2,60	628,80	n.d	35,30
C1	20 - 30	62,40	102,30	31,60	63,90	19,60	63,40	20,60	n.d	2,20	2,40	639,90	n.d	28,40
C2	30 - 57	40,60	53,10	12,40	40,80	12,10	40,00	5,10	n.d	2,50	1,80	566,60	n.d	22,10
C3	57 - 74	40,40	49,40	11,60	40,70	11,90	48,60	n.d	n.d	2,90	2,40	698,10	n.d	25,20
C4	74 - 120+	29,90	37,70	3,00	33,10	6,80	37,90	n.d	n.d	3,00	2,80	649,00	n.d	21,10
P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico														
A	0 - 10	49,30	55,90	11,00	39,80	14,20	53,10	4,40	n.d	1,90	2,90	564,70	n.d	23,20
C1	10 - 22	143,60	122,50	27,70	70,40	43,30	110,20	7,50	n.d	3,80	3,10	462,40	n.d	47,80
C2	22 - 35	81,40	90,80	23,50	60,10	20,90	90,10	4,00	n.d	1,90	2,90	731,80	n.d	36,50
C3	35 - 50	53,60	83,90	12,00	58,20	18,30	73,00	3,50	n.d	11,90	2,70	648,30	n.d	30,40
C4	50 - 70	94,80	99,00	12,10	64,70	29,40	93,80	5,20	n.d	2,00	2,80	673,60	n.d	38,40
C5	70 - 85	80,80	103,90	12,00	74,80	24,60	89,80	5,00	n.d	14,90	3,00	642,20	n.d	42,80
C6	85 - 135	132,80	112,80	26,70	73,30	37,00	110,10	8,30	n.d	2,80	2,60	575,00	n.d	49,10
C7	135 - 145+	70,50	87,80	12,00	58,20	20,50	74,60	11,40	n.d	2,40	2,60	672,80	n.d	39,60

Continua....

Quadro 17. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico														
A	0 - 5	105,10	76,20	32,10	56,90	31,20	95,40	4,50	n.d	2,10	2,40	657,60	n.d	44,70
C1	5 - 40	96,70	97,00	16,90	63,70	27,70	88,20	6,50	n.d	2,80	3,50	569,40	n.d	40,40
C2	40 - 60	104,20	100,10	26,20	63,50	27,80	96,00	4,50	n.d	1,40	2,70	647,20	n.d	41,50
C3	60 - 75	95,90	89,20	23,40	56,20	19,70	141,70	3,80	n.d	1,40	2,50	629,70	n.d	39,00
C4	75 - 103	110,50	100,80	31,40	67,70	33,90	95,90	5,80	n.d	2,30	2,80	618,30	n.d	46,50
C5	103 - 150+	104,70	112,60	24,90	71,10	34,80	103,40	21,90	n.d	2,10	2,60	653,30	n.d	55,20
P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico														
A	0 - 13	37,10	85,90	11,00	67,00	13,80	45,80	10,00	n.d	23,30	2,50	490,90	n.d	22,30
C1	13 - 20	68,30	80,60	13,00	49,70	22,40	69,10	13,60	n.d	2,00	2,40	534,90	n.d	34,00
C2	20 - 28	19,50	55,10	16,00	35,10	10,00	43,30	10,70	n.d	0,00	2,10	314,90	n.d	23,90
C3	28 - 37	27,40	72,00	11,00	52,00	15,70	35,20	9,80	n.d	15,00	2,70	508,30	n.d	17,90
C4	37 - 55	78,30	96,80	21,40	60,90	25,60	77,00	20,90	n.d	1,90	2,80	681,60	n.d	32,10
C5	55 - 75	46,10	89,10	3,00	46,30	15,60	41,60	24,10	n.d	2,10	2,60	401,00	n.d	17,70
C6	75 - 105	83,50	132,00	13,00	73,30	31,10	69,30	33,50	n.d	2,70	3,10	563,30	n.d	29,50
C7	105 - 150	208,30	99,70	18,20	123,30	54,70	92,50	21,90	n.d	0,90	3,50	330,20	n.d	55,00
C8	150 - 175+	100,30	103,70	19,70	64,20	27,10	97,00	n.d	n.d	1,20	2,90	569,40	n.d	40,50

Continua....

Quadro 17. Continuação ...

Hor.	Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----														
P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico														
A	0 -25	26,40	66,30	11,00	58,50	14,60	35,30	4,80	n.d	22,30	2,80	496,10	n.d	17,10
C1	25 - 33	16,30	34,40	3,00	26,30	5,30	24,10	7,10	n.d	1,40	2,30	393,80	n.d	13,20
C2	33 - 52	120,80	87,60	18,00	64,60	32,50	97,60	8,30	n.d	1,80	2,80	543,80	n.d	42,80
C3	52 - 63	46,40	78,60	12,00	75,20	16,70	56,80	6,70	n.d	23,70	3,00	601,60	n.d	28,10
C4	63 - 130	162,40	142,90	27,80	79,60	47,00	115,30	13,30	n.d	2,30	2,80	519,40	n.d	58,20
C5	130 - 140+	26,90	81,00	3,00	49,60	10,50	31,00	11,20	n.d	25,00	2,50	449,50	n.d	15,40

Quadro 18. Teores de metais pesados para os sedimentos da bacia do rio Doce.

Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----													
S1 - Foz do Rio Piranga													
Margem Direita													
0-10	50,80	82,50	12,00	58,10	20,10	54,00	n.d	n.d	2,20	2,60	588,30	n.d	19,90
10-20	24,50	93,30	15,40	53,30	16,80	48,60	n.d	n.d	5,60	3,00	557,90	n.d	17,50
20-30	56,00	92,50	19,30	61,30	22,60	62,20	n.d	n.d	2,90	2,40	516,80	n.d	21,80
S2 - Foz do Rio Carmo													
Margem Esquerda													
0-10	33,60	91,40	35,00	39,30	11,40	33,60	51,00	n.d	1,30	1,60	318,60	n.d	14,50
10-20	25,90	72,00	32,40	38,00	14,30	30,60	55,60	n.d	1,60	2,00	269,60	n.d	14,10
20-30	20,50	50,50	13,00	28,60	7,40	18,80	34,10	n.d	1,30	2,20	313,90	n.d	9,50
S3 - Nascente do Rio Doce													
Margem Esquerda													
0-10	52,50	85,80	16,00	46,30	19,80	37,30	85,30	n.d	1,90	1,90	287,80	n.d	16,50
10-20	146,90	158,30	45,60	113,30	53,30	80,70	152,50	n.d	2,60	2,90	678,70	n.d	33,70
20-30	41,60	77,90	10,00	50,00	21,70	39,40	41,10	n.d	2,20	2,40	609,70	n.d	16,90
Margem Direita													
0-10	41,90	73,30	12,00	51,70	18,30	41,80	18,40	n.d	1,80	2,20	477,00	n.d	13,90
S4 - Foz do Rio Casca													
Margem Direita (Antes)													
0-10	113,60	118,50	12,00	73,90	36,50	71,30	37,60	n.d	2,60	3,20	480,50	n.d	31,20
10-20	147,60	135,70	13,00	90,90	56,10	90,20	42,30	n.d	2,30	3,10	484,30	n.d	35,90
20-30	119,90	144,10	24,70	93,50	39,90	85,20	45,40	n.d	2,20	2,70	608,30	n.d	35,80

Continua....

Quadro 18. Continuação ...

Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----													
S5 - Ipatinga (MG)													
Margem Direita (Antes)													
0-10	79,90	105,60	14,00	64,10	26,00	63,80	13,90	n.d	2,60	2,20	539,00	n.d	22,80
10-25	138,90	144,10	25,80	96,10	47,70	98,40	n.d	n.d	1,10	3,10	537,30	n.d	36,60
25-40	114,80	134,90	15,80	82,60	32,60	84,60	n.d	n.d	1,70	2,40	566,70	n.d	33,60
Margem Esquerda (Depois)													
0-13	134,40	192,90	21,70	89,30	42,80	117,10	18,30	n.d	1,30	2,40	406,60	n.d	39,90
13-27	27,70	53,90	14,80	36,90	13,50	37,00	12,30	n.d	1,30	2,10	461,20	n.d	15,90
Margem Direita (Depois)													
0-15	77,40	133,90	19,00	70,50	29,70	86,40	15,00	n.d	1,90	2,70	547,50	n.d	28,60
15-30	89,00	148,40	28,20	73,40	39,00	94,20	14,50	n.d	2,50	2,70	553,30	n.d	33,10
30-45	93,70	202,10	13,00	71,30	35,40	96,80	17,80	n.d	3,00	2,50	512,50	n.d	32,80
S6 - Naque (MG) - Foz Rio Santo Antonio													
Margem Esquerda (Antes)													
0-10	35,80	78,10	14,00	49,90	22,60	60,10	9,80	n.d	2,70	2,40	458,10	n.d	24,10
10-20	52,40	130,30	13,00	67,00	19,90	82,70	13,70	n.d	2,60	3,10	649,30	n.d	26,30
20-30	52,80	98,00	15,10	64,50	25,80	75,90	12,90	n.d	2,10	2,70	600,60	n.d	25,40
Margem Direita (Antes)													
0-12	112,60	169,50	3,00	88,30	38,30	126,80	18,80	n.d	2,30	2,80	543,60	n.d	41,10
12-25	95,00	143,40	11,00	73,80	28,40	100,60	15,40	n.d	3,40	2,30	572,30	n.d	36,50

Continua....

Quadro 18. Continuação ...

Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----													
S6 - Naque (MG) - Foz Rio Santo Antonio													
Margem Esquerda (Depois)													
0-12	50,20	61,90	10,00	47,00	16,10	62,50	3,40	n.d	2,30	2,40	718,10	n.d	33,20
12-23	74,70	88,70	18,90	59,20	26,60	75,30	5,70	n.d	2,60	2,90	661,70	n.d	37,50
23-35	22,50	32,10	14,60	29,40	12,20	38,70	2,30	n.d	3,00	2,60	555,00	n.d	23,90
Margem Direita (Depois)													
0-10	41,60	89,30	13,50	55,40	22,00	67,30	10,10	n.d	1,80	2,80	566,60	n.d	23,50
10-20	63,70	111,00	26,90	64,80	24,70	81,20	10,80	n.d	2,70	2,10	636,20	n.d	29,90
S7 - Governador Valadares (MG)													
Margem Esquerda (Antes)													
0-10	10,90	40,50	3,00	22,00	4,90	20,10	4,20	n.d	2,10	2,40	406,20	n.d	9,50
10-20	22,80	42,60	12,00	31,40	11,10	41,30	7,90	n.d	2,50	2,60	560,80	n.d	17,80
Margem Direita (Antes)													
0-15	99,90	110,90	13,00	74,00	36,30	109,70	10,20	n.d	2,70	2,60	616,60	n.d	43,40
15-30	91,70	113,20	14,00	69,00	33,40	96,50	13,30	n.d	2,30	2,50	635,10	n.d	38,00
30-45	118,10	123,00	19,60	90,20	42,70	114,90	15,00	n.d	2,10	2,70	574,80	n.d	45,80
Margem Esquerda (Depois)													
0-12	23,80	43,70	11,00	32,90	8,90	39,20	6,00	n.d	1,90	2,00	534,40	n.d	16,20
12-24	15,30	43,20	12,00	30,00	13,20	36,40	8,40	n.d	n.d	2,10	486,90	n.d	16,00
24-36	17,00	38,70	11,00	31,30	9,60	34,90	7,00	n.d	2,00	2,00	502,60	n.d	17,80

Continua....

Quadro 18. Continuação ...

Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----													
S7 - Governador Valadares (MG)													
Margem Direita (Depois)													
0-10	55,30	38,10	18,20	37,70	13,90	52,80	1,30	n.d	n.d	2,40	1385,00	n.d	70,10
10-20	42,50	47,00	12,00	38,90	17,50	53,50	2,80	n.d	2,10	2,40	1485,00	n.d	60,50
20-30	38,40	31,40	12,00	31,30	11,40	39,00	2,00	n.d	1,90	2,50	1807,00	n.d	62,60
S8 - Resplendor (MG)													
Margem Esquerda (Antes)													
0-13	38,00	55,30	13,00	29,30	9,80	45,00	3,60	n.d	n.d	2,30	428,00	n.d	22,40
13-26	95,80	108,90	39,60	55,80	29,10	87,80	9,10	n.d	1,70	2,30	558,60	n.d	40,40
Margem Direita (Antes)													
0-12	47,20	59,40	19,90	40,40	13,20	50,30	2,10	n.d	1,90	2,30	460,90	n.d	18,70
12-24	44,00	66,80	12,00	39,00	20,50	55,40	4,70	n.d	1,70	2,40	653,70	n.d	22,40
24-36	45,30	62,30	13,60	43,30	16,70	51,20	3,20	n.d	1,10	2,20	548,60	n.d	25,40
Margem Esquerda (Depois)													
0-17	50,60	63,50	12,00	42,10	15,10	57,90	7,10	n.d	1,30	2,10	517,70	n.d	24,90
17-34	21,10	35,00	12,00	27,80	5,50	33,20	5,00	n.d	2,10	2,40	469,30	n.d	14,40
Margem Direita (Depois)													
0-10	80,70	74,20	18,10	57,30	22,40	72,00	1,30	n.d	2,40	2,70	671,70	n.d	35,70

Continua....

Quadro 18. Continuação ...

Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----													
S9 - Baixo Guandu (ES)													
Margem Esquerda (Depois)													
0-11	35,50	46,40	12,00	33,00	14,10	36,40	2,40	n.d	1,70	2,20	508,00	n.d	22,00
11-24	24,10	46,00	11,00	28,90	15,20	35,00	3,80	n.d	n.d	2,20	519,90	n.d	17,00
24-36	21,40	32,50	3,00	24,60	7,60	25,20	0,90	n.d	1,60	2,30	509,60	n.d	17,60
Margem Direita (Depois)													
0-15	12,30	37,10	11,00	27,00	5,80	35,10	n.d	n.d	1,90	2,80	1021,00	n.d	18,80
15-24	7,60	32,10	12,00	27,20	11,70	35,80	n.d	n.d	2,30	2,40	940,40	n.d	18,30
24-35	38,60	45,80	3,00	32,60	7,60	43,50	n.d	n.d	1,40	2,60	1058,00	n.d	19,10
S10 - Colatina (ES)													
Margem Esquerda (Antes)													
0-15	75,20	85,70	21,30	52,70	18,60	69,20	7,20	n.d	2,40	2,90	630,00	n.d	31,60
15-30	40,50	60,90	12,00	37,50	11,10	47,90	3,30	n.d	n.d	2,10	595,10	n.d	23,00
Margem Direita (Antes)													
0-15	130,80	113,90	13,60	71,30	36,20	106,20	5,90	n.d	n.d	2,70	556,80	n.d	40,50
15-30	105,10	95,70	22,90	62,10	24,90	87,10	5,00	n.d	2,20	2,90	569,90	n.d	36,70
Margem Esquerda (Depois)													
0-30	92,90	89,20	13,60	56,10	20,50	82,80	4,10	n.d	2,30	2,50	609,30	n.d	34,00
Margem Direita (Depois)													
0-15	9,50	20,30	3,00	17,60	1,30	12,10	7,50	n.d	1,20	2,80	387,90	n.d	11,10
15-30	6,40	18,20	3,00	15,90	1,90	9,80	4,50	n.d	n.d	2,80	342,50	n.d	10,40

Continua....

Quadro 18. Continuação ...

Prof. (cm)	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
----- µg/g -----													
S11 - Linhares (ES)													
Margem Esquerda (Antes)													
0-30	23,60	33,20	n.d	23,80	6,10	23,90	3,10	n.d	1,10	2,90	318,70	n.d	22,90
Margem Direita (Antes)													
0-17	18,70	31,50	11,00	24,30	5,50	28,90	4,50	n.d	1,10	2,50	429,70	n.d	10,80
17-20	44,90	67,10	15,00	39,70	22,90	53,10	5,40	n.d	1,70	2,70	536,10	n.d	23,30
20-25	12,90	31,50	3,00	22,40	4,10	17,40	4,10	n.d	1,60	3,00	394,60	n.d	9,10
Margem Esquerda (Depois)													
0-14	37,00	63,80	11,00	40,30	11,70	44,90	4,90	n.d	2,60	2,40	589,50	n.d	21,80
14-33	111,10	102,40	25,50	67,10	30,80	91,90	11,70	n.d	1,90	2,70	565,40	n.d	39,80
Margem Direita (Depois)													
0-17	59,30	61,40	24,60	41,70	15,50	53,30	1,50	n.d	2,10	2,20	517,50	n.d	27,60
17-28	47,50	54,40	11,80	37,20	13,00	46,00	1,10	n.d	1,40	1,90	558,80	n.d	25,20
S12 - Regência (ES)													
Margem Esquerda (Depois)													
0-22	55,40	65,80	15,30	46,20	17,40	67,10	4,90	n.d	1,80	2,70	713,20	n.d	31,40
22-33	8,10	22,20	3,00	18,30	2,50	13,10	2,80	n.d	1,50	2,90	276,90	n.d	6,80
Margem Direita (Depois)													
0-19	49,20	62,60	11,00	38,30	17,10	41,90	6,00	n.d	0,60	3,00	437,40	n.d	24,90
19-32	69,70	67,50	13,10	44,50	16,40	54,50	9,10	n.d	2,40	2,40	416,30	n.d	29,80

Os valores do fundo geoquímico natural (Quadro 15), determinados pela fluorescência de raios-X, os VRQs (COPAM, 2011) e os VPs (CONAMA, 2009). Ao confrontar tais dados, os valores do fundo geoquímica natural para a bacia do rio Doce estão acima dos VRQs definidos para o Estado de Minas Gerais (COPAM, 2011) com exceção do Cu, As e Se que se apresentaram inferiores. Com relação aos VPs (CONAMA, 2009), o fundo geoquímico natural definido está acima para V, Cr, Ni, Cd e Ba, mas abaixo do Vis (Quadro 15) para a atividade agrícola (CONAMA, 2009). Para Co, Cu, Zn, As, Se, Mo e Pb, estes estão abaixo dos VPs. Assim, para os teores de V, Cr, Ni, Cd e Ba que estão entre o VP e o VI, CONAMA (2009) sugere estudos para identificação da fonte potencial de contaminação e avaliação da ocorrência natural da substância. Sendo assim, no presente estudo, onde os valores do fundo geoquímico natural foram determinados em solos sem influência de atividade antrópica, pode-se inferir que estes valores superiores aos VPs refletem que estes são de ocorrência natural na bacia em estudo, necessitando de estudos complementares para uma possível alteração na legislação do CONAMA (2009) e, conseqüentemente, na COPAM (2011). Tais alterações poderiam ser realizadas definindo os VRQs por bacia hidrográfica ou por classe de solo como sugerido pelo CONAMA (2009) ou até mesmo por regiões com o mesmo material de origem para prover os órgãos ambientais de dados que os permitam balizar a disposição de resíduos de natureza diversa nos solos. Assim, deve-se utilizar com cautela valores restritivos de VRQs, uma vez que implica em um aumento de casos suspeitos de solos contaminados, o que pode comprometer o gerenciamento de áreas contaminadas por parte dos órgãos ambientais (Paye et al., 2010).

A comparação entre o fundo geoquímico natural e os VRQs, mesmo determinados em métodos diferentes (FRX e EPA 3051a), é possível uma vez que ambos foram realizados em solos com alto grau de desenvolvimento ou formado por sedimentos intemperizados no caso dos Neossolos Flúvicos e sedimentos de fundo de rio. Como observado por Caires (2009), avaliando métodos na determinação de teores de metais em solos altamente intemperizados (EPA 3052, EPA 3051a e Água Régia) concluiu não ter diferenças estatísticas. Considerando assim a determinação dos teores de metais pesados pelo método de fluorescência de raios-X é indicado para a determinação de valores de referência de qualidade em solos intemperizados.

De acordo com diversos autores (Bilal et al., 2000; Oliveira, 2002; Gonçalves, 2009; Uhlein, 2014) que avaliaram o teor de metais pesados em rochas da bacia do rio Doce (Quadro 15), estes teores se apresentaram inferiores ao fundo geoquímico natural determinado para os solos da bacia em estudo, com exceção do Ba. Esses teores naturais em rochas, com o processo do intemperismo, podem ser concentrados nos solos pela adsorção nos minerais secundários ou até mesmo substituindo isomorficamente em alguns destes como também pela contaminação antrópica (Stevenson & Cole, 1999).

Os teores totais dos metais pesados para os solos da parte alta da paisagem se apresentaram distintos ao longo da bacia do rio Doce (Quadro 16). Na profundidade de 80-100 cm seus teores variaram de: V (74,1 a 375,2 $\mu\text{g g}^{-1}$); Cr (30,1 a 380,7 $\mu\text{g g}^{-1}$); Co (3,0 a 66,2 $\mu\text{g g}^{-1}$); Ni (20,4 a 169,4 $\mu\text{g g}^{-1}$); Cu (6,2 a 101,1 $\mu\text{g g}^{-1}$); Zn (16,5 a 102 $\mu\text{g g}^{-1}$); As (0,0 a 119,1 $\mu\text{g g}^{-1}$); Mo (0,4 a 3,1 $\mu\text{g g}^{-1}$); Cd (2,2 a 3,2 $\mu\text{g g}^{-1}$); Ba (0,0 a 533,3 $\mu\text{g g}^{-1}$); Pb (10,2 a 56,3 $\mu\text{g g}^{-1}$). Os teores de As apresentaram concentrações muito baixas a nulas (Quadro 16) com a exceção do P7, um Cambissolo Háplico da região de Conselheiro Pena (MG) que apresentou teores de 50,4 a 119,1 $\mu\text{g g}^{-1}$ em superfície e subsuperfície respectivamente. Estes elevados teores de As, como também Ba, Cr, V (Quadro 16) se justificam pela sua formação litológica com tonalitos, granodioritos e granitos (Oliveira, 2000; Kahwage & Mendes, 2005) como também pela exploração mineral pretérita do ouro e atual do berilo dos pegmatitos desta região (Netto et al., 2000; Arias et al., 2005), uma vez que tais atividades ocorrem no vale do rio Doce desde o século XVI (Moraes, 1950).

Os demais teores de metais pesados dos solos coletados sem influência de atividade antrópica ao longo do rio Doce se mostraram condizentes com seu material de origem tais como, ortognaisses, granito-granodiorito, granitóides e biotita gnaiss (CPRM, 2003; CPRM, 2013) e com os teores obtidos em outros trabalhos em diferentes classes de solos de Minas Gerais (Caires, 2009) e Espírito Santo (Paye, 2010).

Na bacia do rio Doce, em todos os compartimentos analisados não se detectou o Hg, no entanto Varejão et al. (2008) encontrou concentrações totais de Hg ao longo do rio do Carmo, um dos afluentes do rio Doce, que variaram de 180 a 690 $\mu\text{g kg}^{-1}$. A não detecção do Hg pela fluorescência de raios-X não é uma limitação da técnica e possivelmente um fator de diluição natural que ocorreu após este elemento entrar no curso do rio Doce. Uma vez se avaliando

o teor deste elemento pelo mesmo equipamento de FRX da amostra certificada *Montana Soil* (NIST 2710) se detectou a concentração estabelecida de 32,6 $\mu\text{g g}^{-1}$.

Assim como em outras regiões do mundo, as diversas atividades praticadas na bacia do rio Doce exercem pressões sobre o meio ambiente, sendo este impactado pela intensa urbanização, uso intensivo dos solos, atividades industriais e mineração. Para a avaliação da contaminação dos metais pesados neste ambiente, os teores totais de metais pesados dos solos aluvias e sedimentos ao longo do rio Doce foram determinados, como observado nos Quadros 17 e 18. As distribuições e quantificações dos metais pesados em sedimentos fluviais são normalmente baseadas nas concentrações obtidas a partir das concentrações totais e comparadas com a caracterização do fundo geoquímico natural (Salomons & Forstner, 1984; Mortatti et al., 2010). A importância de se avaliar estes compartimentos é que Neossolos Flúvicos indicam o histórico de contaminação por metais pesados, uma vez que esses ambientes são utilizados como chave na interpretação da história geológica de uma região (Suguio & Bigarella, 1990). Diversos autores têm trabalhado com Neossolos Flúvicos na tentativa de se estudar a contaminação por metais pesados em bacias hidrográficas no intuito de se avaliar historicamente a contribuição antrópica na contaminação dessas áreas (Davies & Lewin, 1974; Wolfenden & Lewin, 1977; Leenaers et al., 1988; Taylor, 1996; Brewer & Taylor, 1997; Zhao et al., 1999; Ciszewski, 2002; Ciszewski & Malik, 2004; Schulz-Zunkel et al., 2008; Du Laing et al., 2009; Rezaee et al., 2010; Baborowski et al., 2012).

Para se melhor visualizar estes resultados, agruparam-se Neossolos Flúvicos e sedimentos por proximidade de coleta em “ÁREAS” (Figura 13). Esta discussão se inicia na área 1, na nascente do rio Doce, e se estende até a área 11 em Regência – ES, foz do rio Doce (Quadro 19), no intuito de se avaliar a contaminação por metais pesados ao longo do canal deste rio e sua influência antrópica.

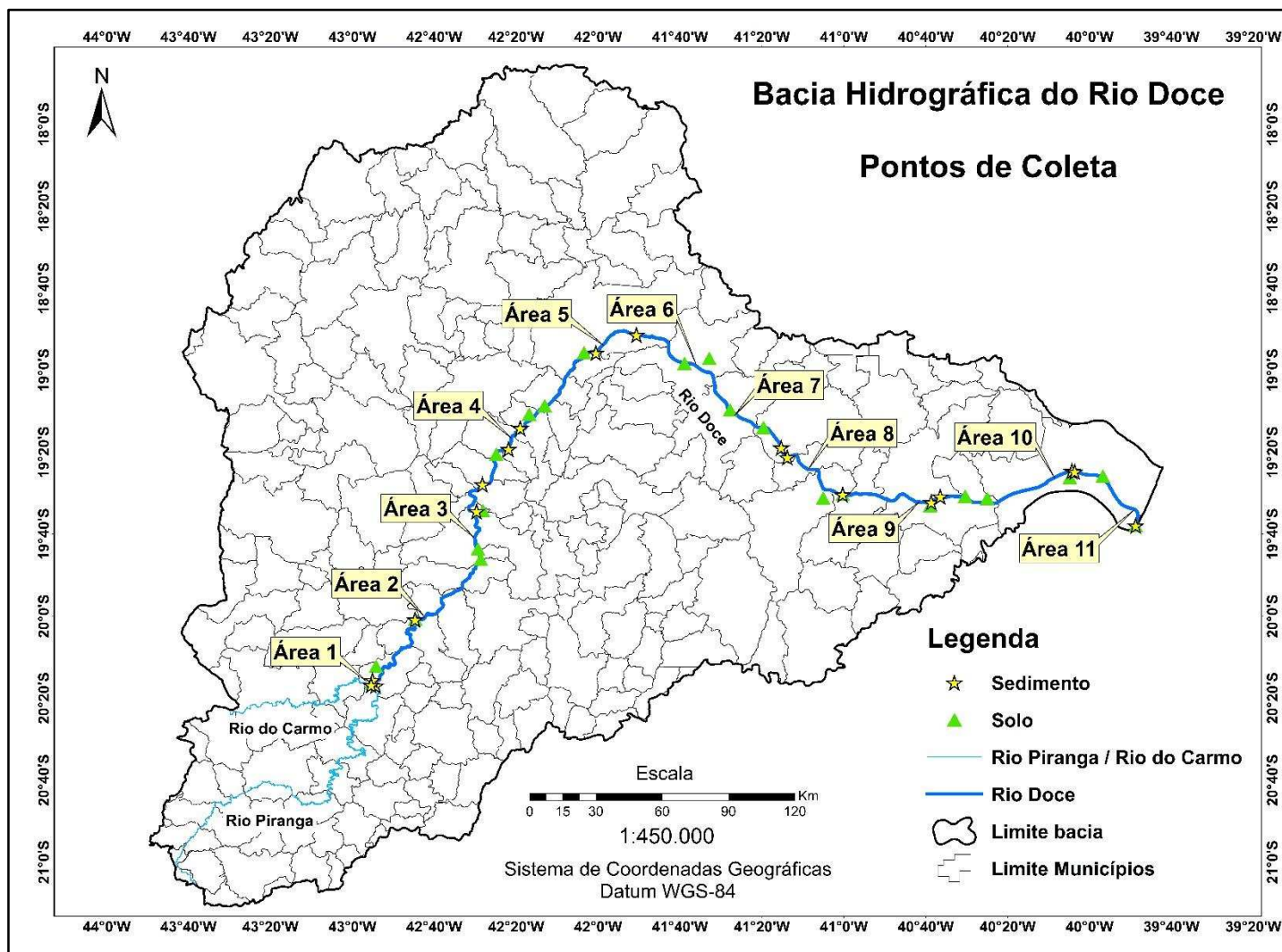


Figura 13. Pontos de coleta distribuídos ao longo da calha principal do rio Doce e seus respectivos agrupamentos em “ÁREAS”.

Quadro 19. Agrupamento em “Área” por proximidade de coleta das amostras dos Solos da parte alta da paisagem, Neossolos Flúvicos e Sedimentos

Área	Localização	Pontos Correspondentes
1	Rio Doce (MG)	P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico S1 - Sedimento - Foz do Rio Piranga S2 - Sedimento - Foz do Rio Carmo S3 - Sedimento - Nascente do Rio Doce
2	Foz do Rio Casca (MG)	P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico S4 - Sedimento - Foz do Rio Casca
3	Ipatinga (MG)	P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico S5 - Sedimento - Ipatinga (MG)
4	Naque / Periquito (MG)	P4 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico S6 - Sedimento - Foz do Rio Santo Antonio
5	Governador Valadares (MG)	P5 - Latossolo Amarelo Distrófico típico S7 - Sedimento - Governador Valadares (MG)
6	Tumiritinga (MG)	P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico
7	Resplendor (MG)	P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico S8 - Sedimento - Resplendor (MG)
8	Baixo Guandu (ES)	P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico S9 - Sedimento - Baixo Guandu (ES)
9	Colatina (ES)	P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico S10 - Sedimento - Colatina (ES)
10	Linhares (ES)	P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico S11 - Sedimento - Linhares (ES)
11	Regência (ES)	P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico S12 - Sedimento - Regência (ES)

Na avaliação dos teores de metais da área 1, que se localiza no encontro do rio Piranga e do Carmo formando o rio Doce, em Minas Gerais (Figura 14), para o Neossolo Flúvico (P12) os teores de V, Zn, Mo, Cd e Pb se apresentaram abaixo do valor do fundo geoquímico natural na maior parte de seus horizontes, de acordo com o quartil 75 % (Quadro 15), com exceção do Cr, Co, Ni, Cu, As e

Ba (Quadro 18) que se apresentaram com teores acima. Para o As (25,2 a 206,5 $\mu\text{g g}^{-1}$) e Ba (461,3 a 611,2 $\mu\text{g g}^{-1}$), seus teores estão mais elevados em comparação com os valores de fundo geoquímico natural que são de 1,8 e 177,6 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente. Ao se observar os teores de As e Ba nos sedimentos (S1, S2 e S3), seus teores variaram respectivamente de 0,0 e de 516,8 a 588,3 $\mu\text{g g}^{-1}$ nos sedimentos do rio Piranga; 34,1 a 55,6 $\mu\text{g g}^{-1}$ e de 269,6 a 318,6 $\mu\text{g g}^{-1}$ no rio do Carmo; 41,1 a 152,5 $\mu\text{g g}^{-1}$ e de 287,8 a 678,7 $\mu\text{g g}^{-1}$ no rio Doce (Quadro 18). Assim, os teores de As estão elevados no P12, S2 e S3 e de Ba no P12, S1, S2 e S3. Na margem esquerda na profundidade de 10 – 20 cm do S3, se observa que os teores de todos os metais analisados estão acima do fundo geoquímico natural, com exceção apenas do Pb (Quadro 18). Como os teores de Cr, Co, Ni, Cu, As e Ba estão acima dos valores de prevenção do CONAMA (2009), estes requerem a identificação da fonte potencial de contaminação e avaliação da possível ocorrência natural destes elementos para controle das fontes e monitoramento da qualidade do solo.

Os altos teores de As observados na Área 1 são consequências da influência da litologia do Quadrilátero Ferrífero por onde o rio do Carmo, afluente do rio Doce, passa e pelas atividades minerárias nas cidades de Ouro Preto e Mariana (CPRM, 2005; Varejão et al., 2009). As fontes naturais de contaminação por As estão relacionadas às rochas que hospedam depósitos auríferos sulfetados, como as da região do Quadrilátero Ferrífero (MG) e as fontes antropogênicas estão relacionadas com atividades de mineração e refino de minério de alguns destes depósitos auríferos. Desta forma, só o Quadrilátero Ferrífero respondeu pela produção de 1.300 t de Au nos últimos três séculos e, considerando a razão As/Au nos minérios, estima-se que pelo menos 390.000 t de As devem ter sido liberadas para o ambiente (Matschullat et al., 2000). Dessa forma, fica evidente que a região apresenta problemas de contaminação com o elemento.

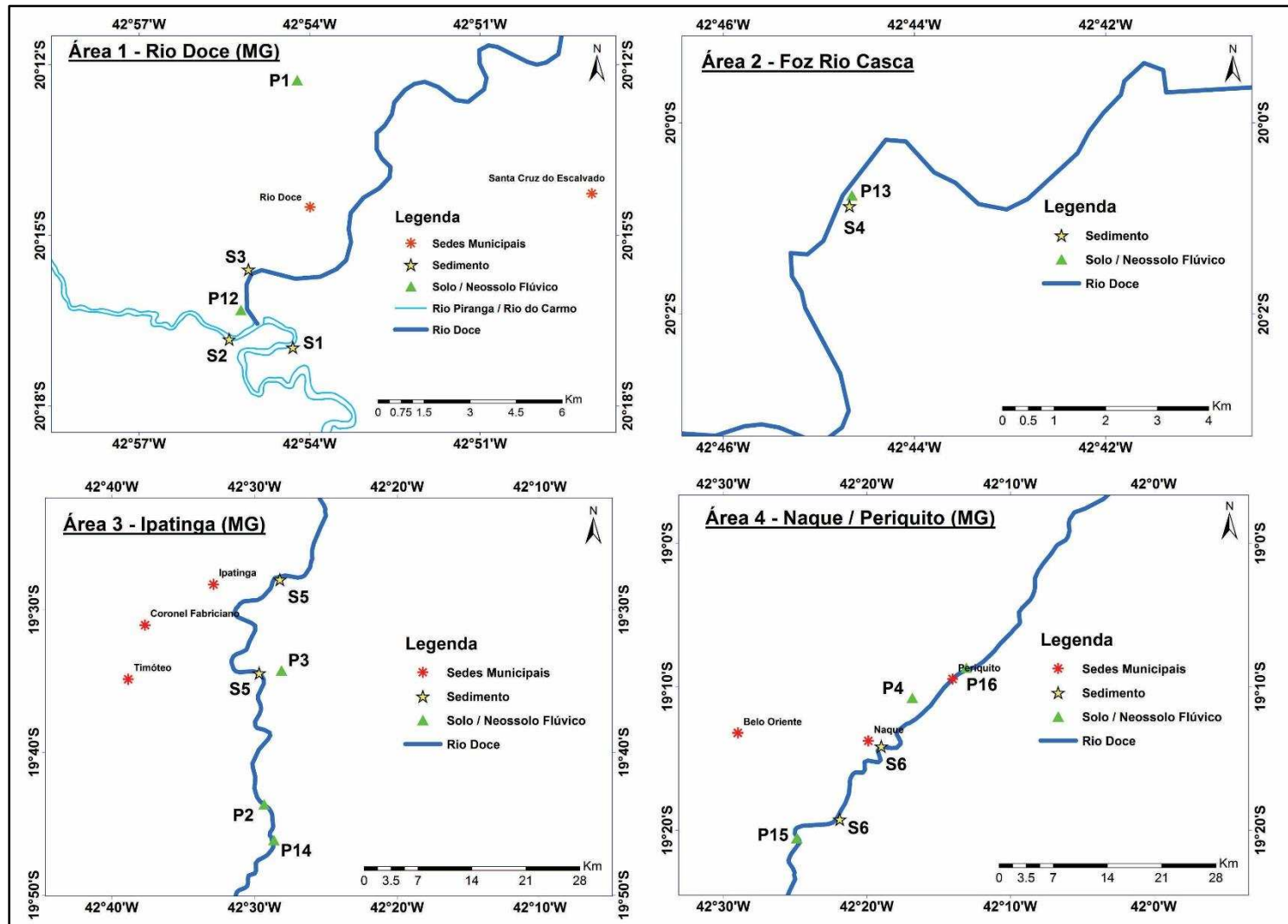


Figura 14. Mapa com os pontos de coleta espacializados ao longo do rio Doce para as Áreas 1, 2, 3 e 4.

Os altos teores de Ba, podem ser explicados por Kabata-Pendias & Mukherjee (2007) que postularam que este elemento possui uma afinidade litológica e é comumente concentrado em rochas ígneas ácidas e sedimentos argilosos com teores de 250 a 1200 $\mu\text{g g}^{-1}$. Uma vez que teores intermediários a estes foram encontrados para a área em questão, e que esta é formada por gnaisses e granitos, se justificam os teores encontrados. Um outro fato deste elemento é que, em processos geoquímicos, este é usualmente associado com K devido à similaridade de seus raios iônicos (McBride, 1994; Madejón, 2013), e portanto, segue o caminho do K em processos geoquímicos, onde sua presença está associada com feldspatos alcalinos e biotita, fato este, corroborado pela correlação de Person positiva ($p < 5\%$) com $r = 0,78$ entre K e Ba das amostras deste estudo.

A área 2 (Quadro 16) se localiza a montante da foz do rio Casca, um dos afluentes do rio Doce. Neste ponto se agrupou o P13 (Neossolo Flúvico) e o S4 (sedimento de fundo) para a avaliação dos teores de metais pesados (Figura 14). Em geral, os teores de metais para o P13 se encontram abaixo do fundo geoquímico natural, com exceção do As e Ba que se apresentam, respectivamente com teores de 10 e 3 vezes acima, mas inferiores aos encontrados para As na área 1. Em algumas profundidades do P13 se observaram valores acima do fundo geoquímico natural para Cr, Co, Ni, Cu e Cd, sempre de forma alternada dos horizontes, deixando claro seu caráter flúvico. Para o S4 os teores de Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd e Ba se apresentam acima do fundo geoquímico natural, enquanto V, Cr, Co e Hg estão abaixo ou próximos (Quadro 18).

A região da cidade de Ipatinga corresponde a área 3, representada pelo P14 e o S5 (Quadro 17 e 18). Para o Neossolo Flúvico (P14) se observa que todos os metais analisados se apresentam acima do valor do fundo geoquímico natural em todos os horizontes (As e Ba) ou apenas em alguns (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo Cd e Pb). Uma vez que os sedimentos constituem uma armadilha para poluentes e tem demonstrado ser uma ferramenta eficiente para identificar impactos ambientais (Frohener et al., 2009), o S5 foi coletado antes e depois da cidade de Ipatinga no intuito de se avaliar a influência antrópica nos teores de metais. Assim, foi possível observar que alguns elementos obtiveram incremento em seus teores nas amostras coletadas depois da cidade em comparação com a amostragem antes da cidade (Quadro 18), mas não de forma muito expressiva.

Tais teores antes e depois para alguns elementos foram; Cr (105,6 para 202,1 $\mu\text{g g}^{-1}$), Co (14 para 28,2 $\mu\text{g g}^{-1}$), Zn (63,8 para 117,1 $\mu\text{g g}^{-1}$), As (13,9 para 18,3 $\mu\text{g g}^{-1}$). Alguns elementos como o Cu, Mo, Cd e Ba, apresentaram teores elevados e acima do fundo geoquímico natural tanto antes como depois da cidade.

Para a área 4, se agrupou o P15, P16 e o S6. O S6 foi coletado antes e depois da foz do rio Santo Antonio (Quadro 18), para avaliar a contaminação de um importante afluente do rio Doce. Neste ponto não se observou qualquer tendência de aumento nos teores de metais antes ou depois desse afluente, mas de forma geral o Cr, Ni, Zn, As, Mo, Cd e Ba apresentaram teores superiores ao valor do fundo geoquímico natural, indicando provável contaminação antrópica. Para os Neossolos Flúvicos (P15 e 16) As e Ba se apresentaram com teores elevados em todas as profundidades e Ni, Zn, Mo, Cd em alguns de seus horizontes.

Para as áreas 5 e 6, correspondente as regiões de Governador Valadares até Tumiritinga (Quadro 16), se observou teores de metais para o P17 acima do valor do fundo geoquímico natural para todos os elementos analisados (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Ba e Pb). O S7 foi coletado antes e depois da cidade de Governador Valadares (Figura 15), mas não foi possível observar a tendência de maiores teores de metais depois em comparação com o ponto de coleta antes da cidade. Para o sedimento da margem direita, o Ba, Ce e Pb apresentaram teores muito elevados se comparado aos já encontrados neste trabalho, nas faixas de 5, 3 e 1,5 vezes maior que o fundo geoquímico natural, respectivamente (Quadro 18). Os teores de As variaram de 1,3 a 15 $\mu\text{g g}^{-1}$, valores estes superiores ao fundo geoquímico natural, mas inferiores aqueles encontrados na área 1 pela influência do rio do Carmo e suas atividades de mineração.

Na avaliação da área 7, correspondente a região da cidade de Resplendor (MG), apenas os teores de As e Ba se encontram acima do fundo geoquímico natural, com exceção da profundidade de 57 - 120 cm no P18, que apresentou valores nulos, sendo os outros metais possuindo teores inferiores, tanto para o P18 e S8. Neste ponto também se coletaram os sedimentos antes e depois da cidade de Resplendor (Figura 15), mas não se observou incremento nos teores dos metais avaliados como influência da atividade antrópica.

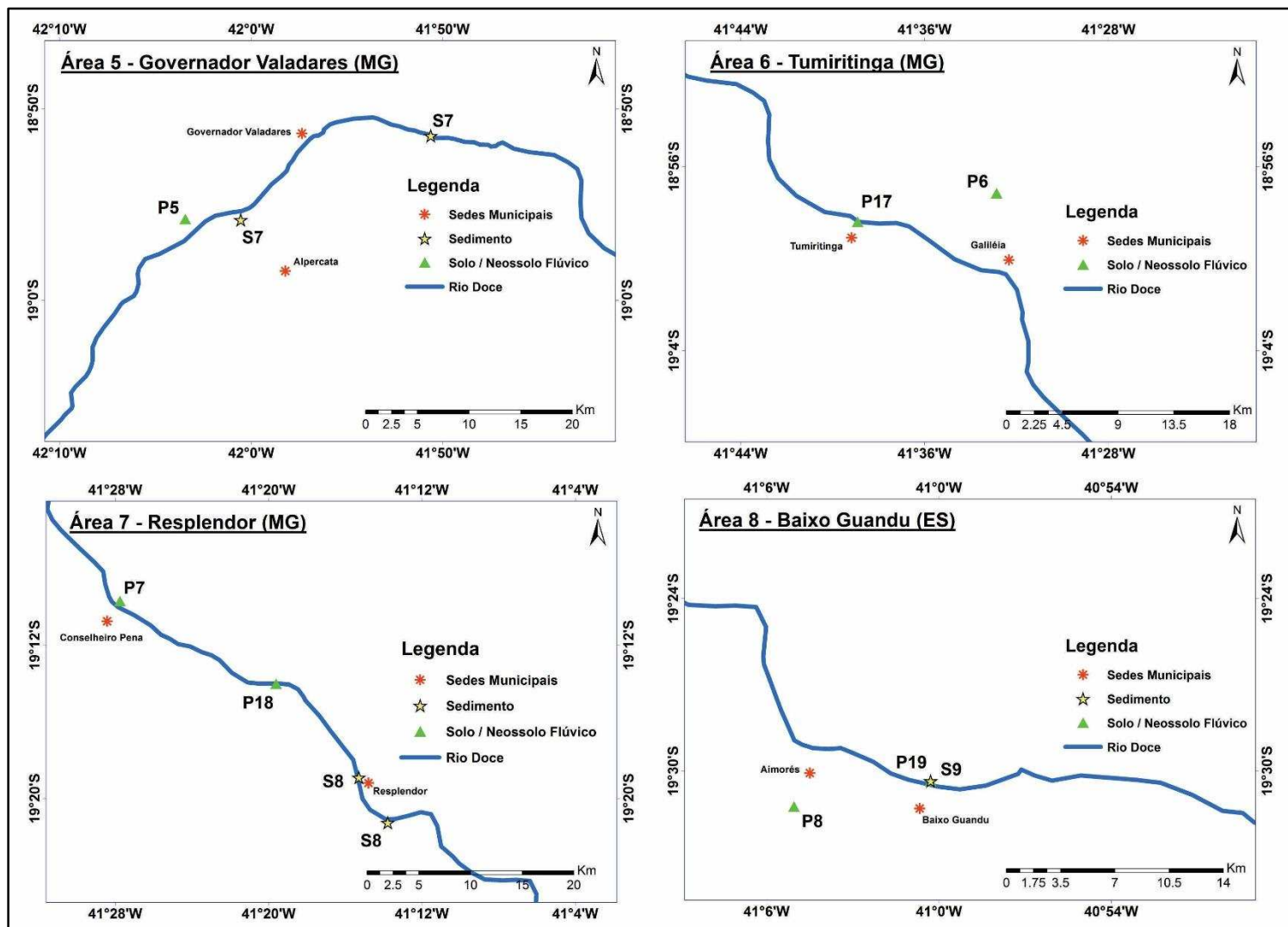


Figura 15. Mapa com os pontos de coleta especializados ao longo do rio Doce para as Áreas 5,6,7 e 8.

A área 8 corresponde a região da cidade de Baixo Guandu (ES) representada pelo P19 e S9. Para o Neossolo Flúvico os metais que se apresentaram acima do fundo geoquímico natural foram o Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd e Ba. Para o sedimento (S9) apenas os elementos As e Ba se mostraram com teores superiores. A variação dos teores foram de 3,5 a 11,4 $\mu\text{g g}^{-1}$ para o As e de 462,4 a 731,8 $\mu\text{g g}^{-1}$ para o Ba. A área 9, correspondente a região de Colatina (ES), tanto o P20 e S10 apresentaram teores de Zn, As e Ba acima do valor de fundo geoquímico natural (Quadro 17 e 18). Para a avaliação da contaminação por metais pesados pela atividade antrópica se coletou os sedimentos de fundo antes e depois da cidade de Colatina (Figura 16). Como observado no Quadro 19, tais teores não se diferenciaram nas amostras coletadas antes e depois.

As áreas 10 e 11, correspondentes à região das cidades de Linhares e Regência (ES), inseridas nos sedimentos do quaternário da formação Barreiras (CPRM, 2013), apresentaram apenas os teores de As e Ba acima do valor do fundo geoquímico natural (Quadro 15, 17 e 18). Na avaliação dos sedimentos coletados antes e depois da cidade de Linhares (Figura 16), se observou uma pequena tendência no aumento dos teores de alguns metais, tais como Cr, Zn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Ba e Pb. Mas tais teores estão a baixo dos valores do fundo geoquímico natural definido para a bacia em estudo.

Em geral, avaliando os teores de metais pesados ao longo do rio Doce e considerando a grande produção de sedimentos e processos erosivos, juntamente com a presença marcante de indústrias e grandes centros urbanos que possam estar gerando resíduos de contaminação por metais pesados nesta área, os teores de Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd e Ba se mostraram elevados em comparação com o valor do fundo geoquímico natural para esta bacia. Valores semelhantes foram encontrados por Mortatti et al. (2010) avaliando a qualidade dos sedimentos da bacia do rio Tietê no Estado de São Paulo.

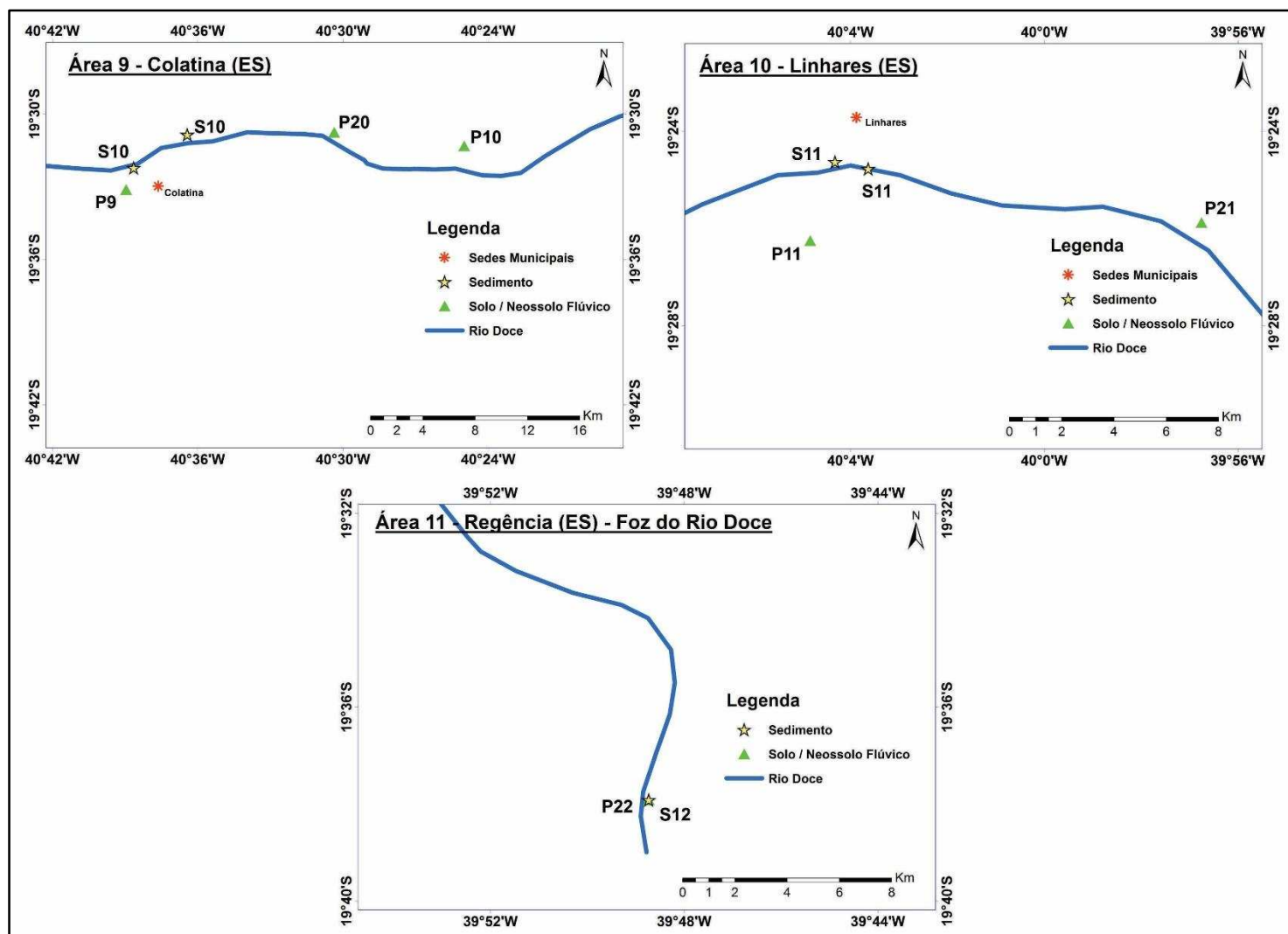


Figura 16. Mapa com os pontos de coleta especializados ao longo do rio Doce para as Áreas 9,10 e 11.

Ao se analisar os teores de metais pesados dos sedimentos coletados antes e depois de alguns centros urbanos (Ipatinga, Governador Valadares, Resplendor, Colatina e Linhares) e foz de rio (rio Santo Antônio), não foi possível visualizar, de forma clara, a contribuição da contaminação antrópica desses pontos. Isso foi observado por Leenaers et al. (1988) em Neossolos Flúvicos de dois rios na Alemanha, onde avaliando o padrão de dispersão longitudinal de metais em sedimentos, observou que fatores físicos podem produzir taxas variáveis de transporte e deposição dos metais, tais como: tamanho da partícula, descarga do rio (Salomons & de Groot, 1978) e diluição resultante da mistura de materiais erodidos das margens e terraços aluviais (Figura 17). Assim, a combinação desses efeitos com os rejeitos de indústrias e da mineração pode causar a dispersão dos metais pesados rio abaixo, não sendo possível uma comparação a curta distância como pretendida na coleta antes e depois de cidades ou outra fonte de contaminação.

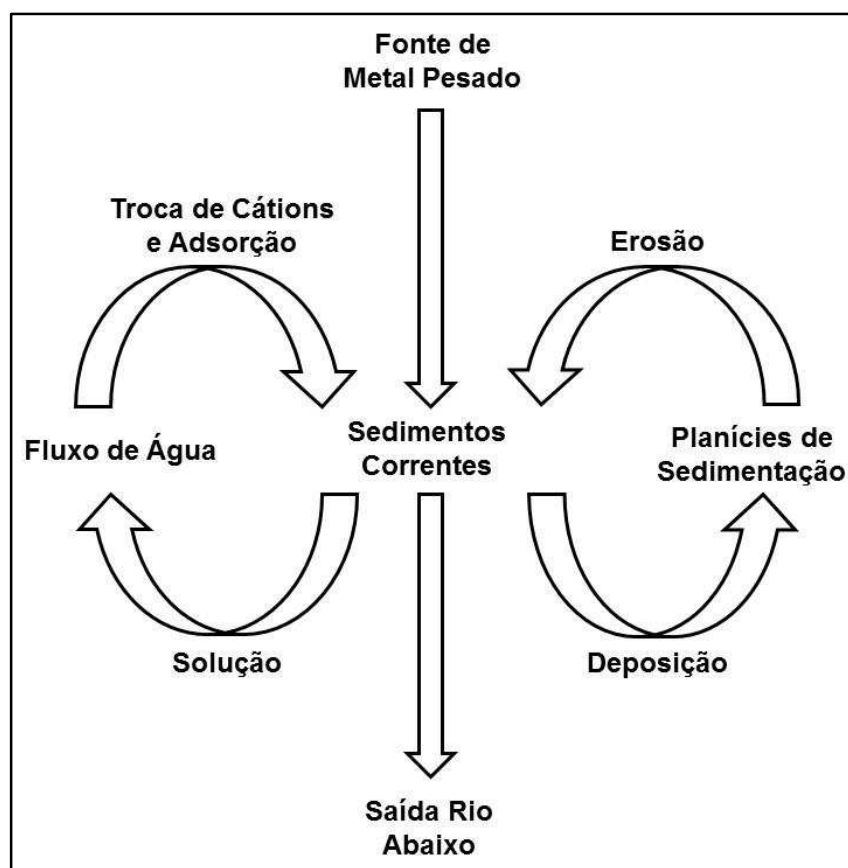


Figura 17. Processo de troca de metal pesado durante transporte de sedimentos correntes contaminados. Adaptado de Leenars et al., 1988.

Para distinguir os metais pesados provenientes de atividades humanas dos teores naturais, calculou-se o Fator de Enriquecimento (Figura 18),

parâmetro este que é uma parte essencial nos estudos geoquímicos (Praveena et al., 2010; Chaudhuri et al., 2014; Fernández-Cadena et al., 2014). Para o cálculo deste fator se utilizou a formula:

$$FE = [(Metal_S/Ti_S)/(Metal_{FGN}/Ti_{FGN})].$$

Em que Metal é a concentração do metal pesado nos Neossolos Flúvicos e sedimentos (S) em relação ao fundo geoquímico natural (FGN) definido para este estudo (Salomons et al., 1984; Dickinson et al., 1996), utilizando o titânio como elemento normalizador (Reimann & Caritat, 2004). Para esta avaliação se considera contribuições naturais ($FE < 2$) e antrópicas ($FE > 2$) de acordo com Sposito (1989).

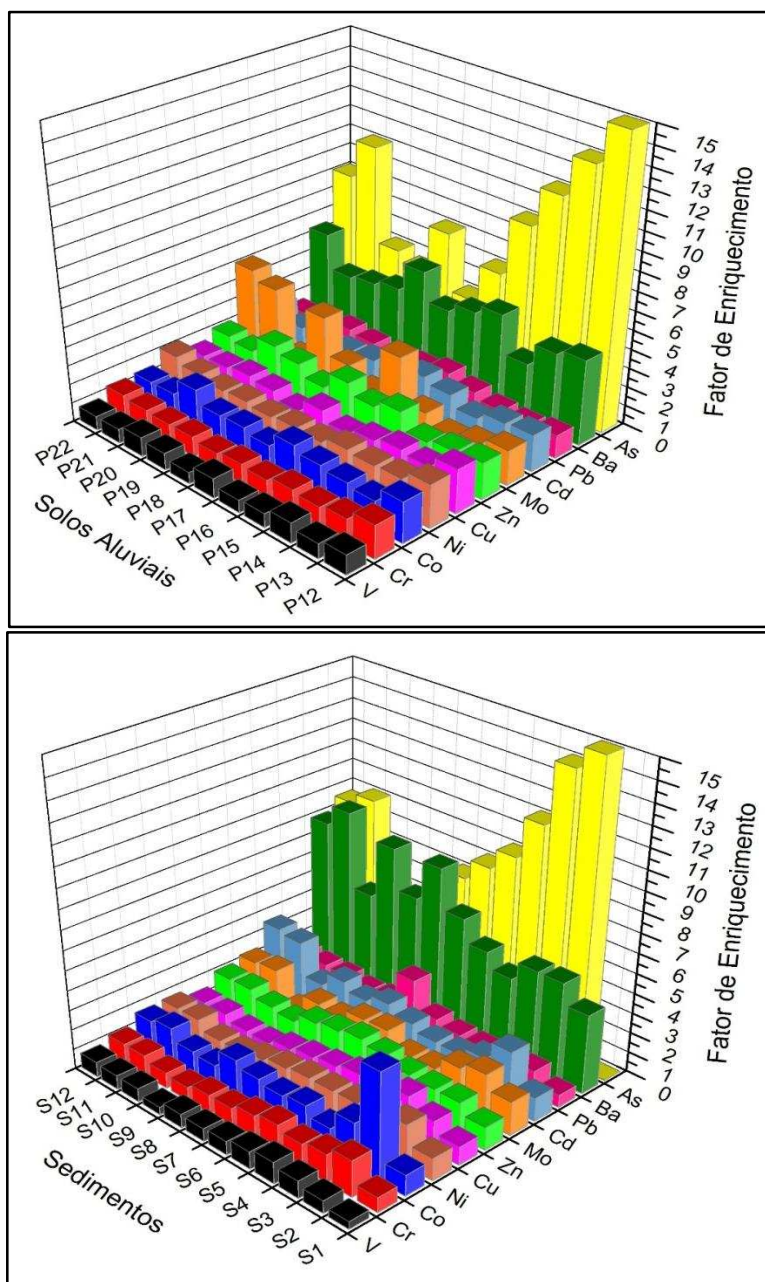


Figura 18. Avaliação do fator de enriquecimento normalizado pelo Ti para metais pesados em Neossolos Flúvicos e sedimentos ao longo da bacia do rio Doce.

A Figura 18 ilustra a variabilidade do fator de enriquecimento dos metais pesados V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Pb, Ba e As ao longo do rio Doce, desde sua nascente no encontro do rio Piranga e do Carmo até sua foz na cidade de Regência (ES). Os resultados mostraram que os elementos de maior contribuição por contaminação antrópica foram o As, Ba, Mo e Zn para os Neossolos Flúvicos (Brewer & Taylor, 1997; Rezaee et al., 2010) e de As, Ba, Co, Pb e Cd para os sedimentos do rio Doce (Aprile & Bouvy, 2008; Mortatti et al., 2010). Apenas para As e Ba o FE se mostrou muito superior ao valor 2 que limita a contribuição natural, evidenciando uma alta contaminação por estes elementos. Mesmo para o Ba que possui uma forte afinidade com a litologia (McBride, 1994; Madejón, 2013). Ao observar o FE do As ao longo do rio Doce, se observa que existe um decréscimo neste índice a medida que se distancia da nascente (Figura 18). A maior fonte deste elemento é pelo rio do Carmo, influenciada pela litologia e atividades minerárias da região.

Os Quadros 20, 21 e 22 apresentaram os coeficientes da correlação de Person ($p < 1\%$ e 5%) entre os teores de metais pesados e os de Si, Al, Fe, Mn e Ti dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos da bacia do rio Doce. Verificou-se uma correlação positiva entre Fe, Al e Ti para os Neossolos Flúvicos e sedimentos, mostrando que estes elementos possuem um comportamento geoquímico similar (Fontes & Weed, 1991; Burak, 2010) pelo alto grau de intemperismo sofrido por estes materiais, onde sua mineralogia típica apresenta minerais secundários tais como hematita, goethita e gibbsita (Fontes & Weed, 1991). Para os solos da parte alta da paisagem, não se observou correlação entre o Al com Fe, Ti e Mn, pelo fato da mineralogia não apresentar o mineral gibbsita nestes solos, indicando uma possível concentração maior de Si, inibindo a formação deste mineral (McKeague & Cline, 1963). Ao contrário dos Neossolos Flúvicos e sedimentos onde o mineral secundário gibbsita se apresenta em todas as amostras e profundidades. A correlação negativa entre o Si com o Al, Fe e Ti dos Neossolos Flúvicos e sedimentos indica o comportamento geoquímico natural, onde a medida que ocorre a intemperização e lixiviação do Si, este fato irá propiciar a formação dos óxidos de Fe, Al, Ti e Mn (Fontes & Weed, 1991).

Quadro 20. Correlação de Person entre os teores de metais pesados e Si, Al, Fe, Ti e Mn dos solos da bacia do rio Doce.

	Si	Al	Fe	Ti	Mn	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb
Si	1															
Al	-0,75**	1														
Fe	-0,63**	0,37	1													
Ti	-0,53*	0,18	0,62**	1												
Mn	-0,42	0,07	0,71**	0,63**	1											
V	-0,58**	0,37	0,84**	0,80**	0,82**	1										
Cr	-0,43*	0,34	0,67**	0,51	0,86**	0,79**	1									
Co	-0,44*	0,15	0,76**	0,55**	0,79**	0,68**	0,59**	1								
Ni	-0,56**	0,35	0,73**	0,66**	0,90**	0,87**	0,91**	0,74**	1							
Cu	-0,57**	0,29	0,81**	0,76**	0,91**	0,92**	0,87**	0,79**	0,97**	1						
Zn	-0,48	0,20	0,66**	0,54	0,74**	0,65**	0,54**	0,74**	0,74**	0,76**	1					
As	0,24	-0,00	-0,00	-0,28	-0,10	-0,09	-0,08	-0,08	-0,01	-0,09	0,26	1				
Mo	0,21	-0,20	-0,47*	-0,17	-0,32	-0,32	-0,26	-0,42*	-0,35	-0,35	-0,47*	-0,14	1			
Cd	0,12	-0,18	-0,03	-0,17	0,23	-0,01	0,40	-0,04	0,12	0,05	-0,04	-0,19	0,07	1		
Ba	-0,29	0,20	0,20	0,15	0,08	0,02	-0,09	0,43*	0,19	0,19	0,58**	0,45*	-0,23	-0,37	1	
Pb	-0,48*	0,43*	0,03	0,19	-0,29	-0,10	-0,36	0,06	-0,09	-0,05	0,20	-0,02	-0,19	-0,46	0,69**	1

*p>0,05 **p<0,01

Quadro 21. Correlação de Person entre os teores de metais pesados e Si, Al, Fe, Ti e Mn dos Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce.

	Si	Al	Fe	Ti	Mn	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb
Si	1															
Al	-0,83**	1														
Fe	-0,76**	0,61**	1													
Ti	-0,81**	0,65**	0,61**	1												
Mn	-0,63**	0,51**	0,85**	0,42**	1											
V	-0,91**	0,80**	0,75**	0,80**	0,65**	1										
Cr	-0,80**	0,72**	0,84**	0,59**	0,80**	0,79**	1									
Co	-0,61**	0,48**	0,45**	0,45**	0,42**	0,55**	0,49**	1								
Ni	-0,82**	0,75**	0,78**	0,63**	0,67**	0,87**	0,87**	0,49**	1							
Cu	-0,87**	0,77**	0,79**	0,73**	0,70**	0,94**	0,85**	0,56**	0,90**	1						
Zn	-0,84**	0,77**	0,48**	0,72**	0,39**	0,78**	0,59**	0,48**	0,60**	0,68**	1					
As	-0,07	0,07	0,40**	-0,06	0,46**	0,1	0,42**	0,05	0,23*	0,26*	-0,18	1				
Mo	0,21	-0,05	-0,31**	-0,29**	-0,29**	-0,24*	-0,1	-0,17	0,03	-0,19	-0,2	-0,14	1			
Cd	-0,49**	0,42**	0,27	0,44**	0,2	0,48**	0,31**	0,15	0,49	0,45**	0,47**	-0,11	0,12	1		
Ba	-0,36**	0,38**	0,08	0,13	0,12	0,15	0,23*	0,14	0,16**	0,13	0,49**	-0,09	0	0,19	1	
Pb	-0,85**	0,81**	0,48**	0,74**	0,40**	0,83**	0,55**	0,56**	0,65**	0,74**	0,87**	-0,17	-0,1	0,50**	0,31**	1

*p>0,05 **p<0,01

Quadro 22. Correlação de Person entre os teores de metais pesados e Si, Al, Fe, Ti e Mn dos sedimentos da bacia do rio Doce.

	Si	Al	Fe	Ti	Mn	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb
Si	1															
Al	-0,86**	1														
Fe	-0,69**	0,45**	1													
Ti	-0,78**	0,75**	0,47**	1												
Mn	-0,64**	0,46**	0,82**	0,35**	1											
V	-0,91**	0,80**	0,64**	0,66**	0,65**	1										
Cr	-0,83**	0,74**	0,72**	0,68**	0,76**	0,85**	1									
Co	-0,52**	0,44**	0,62**	0,36**	0,57**	0,49**	0,48**	1								
Ni	-0,90**	0,79**	0,69**	0,73**	0,68**	0,93**	0,93**	0,52**	1							
Cu	-0,89**	0,77**	0,67**	0,69**	0,67**	0,93**	0,89**	0,51**	0,96**	1						
Zn	-0,92**	0,86**	0,59**	0,69**	0,65**	0,89**	0,88**	0,41**	0,89**	0,88**	1					
As	-0,28*	0,05	0,61**	0,09	0,52**	0,33**	0,38**	0,50**	0,42**	0,41**	0,11	1				
Mo	-0,31**	0,35**	0,19	0,51**	0,18	0,18	0,35**	0,15	0,35**	0,27*	0,29*	0,12	1			
Cd	-0,29*	0,22	-0,08	0,31**	0,02	0,33**	0,24*	-0,12	0,32**	0,33**	0,29*	0,00	0,23	1		
Ba	-0,19	0,35**	-0,15	0,07	-0,17	0,02	-0,11	0,00	0,00	0,00	0,09	-0,17	0,05	0,07	1	
Pb	-0,70**	0,76**	0,34**	0,42**	0,32**	0,64**	0,43**	0,31**	0,53**	0,56**	0,67**	0,00	0,08	0,20	0,65**	1

*p>0,05 **p<0,01

A correlação entre os metais pesados e os teores dos óxidos se apresentou positiva entre Fe, Al, Ti e Mn com o V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo e Pb devido ao comportamento geoquímico deste com os óxidos, com diferentes tipos de ligação de superfície, como já se verificou na literatura por diversos trabalhos que discutiram a correlação entre os teores de metais pesados, minerais silicatados e os óxidos de Fe, Al e Mn (McKenzie, 1980; Swift & McLaren, 1991; Schwertmann & Taylor, 1989; Fontes et al., 2000; Matos et al., 2001; Agbenin & Olojo, 2004; Wang & Qin, 2006; Moreira et al., 2008; Fontes & Santos, 2010; Burak et al., 2010; Cerqueira et al., 2011; Fontes, 2012). Tais correlações também foram encontradas para sedimentos e Neossolos Flúvicos por outros autores (Nolting et al., 1999; Ryssen et al., 1999; Mortatti, 2010). Apenas entre os teores de Ba e os óxidos de Fe e Mn não foi encontrada tal correlação, uma vez que este elemento possui afinidade com a litologia, comumente concentrado em rochas ígneas ácidas e sedimentos argilosos (McBride, 1994; Kabata-Pedias & Mukherjee, 2007).

4.4. Suscetibilidade magnética e sua relação com os metais pesados

A suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e a frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética por unidade de massa apresentaram uma grande variação entre as classes de solos e principalmente destas com os Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce (Quadro 23 e 24). Para os solos com cor 7,5 YR ou mais amarelos (P2, P5, P7, P9, P10 e P11) os valores da χ_{BF} variaram de 7,56 a $71,64 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Para os solos com cor 5YR ou mais vermelhos (P1, P3, P6 e P8) estes variaram de 41,20 a $248 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (Quadro 23). Valores semelhantes foram encontrados por outros autores em solos de semelhante litologia com ausência de minerais ferrimagnéticos (Resende et al., 1986; Fontes, 1992; Fontes et al., 2000; Fialová et al., 2006), como também no Iran, México, China, Inglaterra e República Tcheca (Schmidt et al., 2005; Lu & Bai, 2006; Morton-Bermea et al., 2009; Karimi et al., 2011). Vale ressaltar, entretanto, que tais valores são relativamente baixos se comparados a solos desenvolvidos a partir de rochas máficas. Estes podem alcançar $10.000 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ como em alguns Latossolos Vermelhos desenvolvidos sobre basalto, itabirito ou tufito (Ker, 1995; Fontes et al., 2000; Camêlo, 2013).

Quadro 23. Valores de suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e de frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética por unidade de massa para os solos da bacia do rio Doce

Hor.	Prof. (cm)	χ_{BF}				χ_{FD}			
		TFSA	Areia	Silte	Argila	TFSA	Areia	Silte	Argila
----- 10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹ -----						----- % -----			
P1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico									
A	0 - 20	121,60	22,19	177,95	270,95	10,70	9,40	5,31	12,86
Bw	80 - 100	17,82	4,25	18,32	58,63	10,44	0,00	0,00	21,85
P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	13,50	6,12	18,30	16,39	9,09	4,29	9,09	16,49
Bw	80 - 100	7,56	4,17	6,54	7,40	0,00	-2,70	9,09	0,00
P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico									
A	0 - 20	149,97	59,43	136,57	200,82	13,06	5,35	11,79	14,12
Bt	70 - 90	248,05	47,09	195,86	396,49	12,21	5,85	9,03	12,47
P4 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico									
A	0 - 20	67,72	29,34	132,56	79,11	6,51	2,43	4,06	14,16
Bt	80 - 100	54,53	29,43	113,80	67,00	9,11	2,03	2,82	7,57
P5 -Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	34,82	39,33	97,24	27,72	4,53	1,35	2,19	7,29
Bw	80 - 100	36,54	33,15	125,48	29,96	8,90	1,15	3,27	15,00
P6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico									
A	0 - 20	140,60	25,86	120,19	235,68	15,18	10,86	11,69	17,41
Bt	80 - 100	144,43	6,67	91,98	185,06	16,96	5,49	12,34	14,76
P7 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico									
A	0 - 20	32,70	3,88	38,44	148,00	9,73	7,14	5,03	7,08
Bi	30 - 50	71,64	6,61	48,94	165,02	12,80	1,08	10,26	14,04
P8 - Argissolo Vermelho Distrófico típico									
A	0 - 20	41,20	5,54	76,51	93,96	14,18	20,24	3,60	16,85
Bt	80 - 100	98,89	5,31	95,40	102,04	16,91	10,47	6,63	33,06
P9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	20,20	12,84	55,27	39,88	6,88	2,44	0,00	22,92
Bw	80 - 100	38,60	6,93	72,04	48,04	14,42	3,60	2,53	12,74
P10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico									
A	0 - 20	18,83	10,23	64,58	30,42	10,23	11,39	11,01	23,81
Bw	80 - 100	10,34	3,20	93,83	9,87	1,82	10,20	2,91	33,33
P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico									
A	0 - 20	8,79	6,46	9,16	8,10	9,52	0,00	5,66	8,70
Bi	80 - 100	9,17	5,36	11,74	8,76	1,06	17,39	14,55	0,00

Quadro 24. Valores de suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e de frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética por unidade de massa para os Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce

Hor.	Prof. (cm)	χ_{BF}				χ_{FD}			
		TFSA	Areia	Silte	Argila	TFSA	Areia	Silte	Argila
----- $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ -----									
----- % -----									
P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico									
A	0 - 10	659,61	754,96	574,52	164,02	0,24	0,14	0,40	10,45
C3	33 - 40	641,80	693,17	496,33	165,24	0,62	0,17	1,43	13,85
C8	120 - 180	422,98	446,02	491,69	164,81	0,48	-0,02	0,39	9,65
P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico									
A	0 - 10	596,78	511,49	496,91	137,94	-0,08	0,33	1,39	9,09
C5	81 - 112	311,97	329,04	318,34	209,17	1,77	0,39	1,37	12,34
P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico									
A	0 - 4	115,09	189,58	91,95	20,70	1,83	0,60	-0,35	-3,45
C3	36 - 80	120,26	125,04	146,13	37,43	2,02	2,08	0,12	3,17
P15 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico									
A	0 - 10	226,00	206,94	368,18	114,00	0,00	0,09	1,32	16,42
C4	105 - 120	152,03	171,98	150,95	88,71	1,12	1,04	2,60	10,73
P16 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 8	322,78	331,13	265,80	82,90	0,34	-0,02	1,41	10,99
C4	70 - 105	120,07	64,52	52,89	85,64	1,23	0,00	-3,85	15,70
P17 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 18	101,11	98,97	123,76	90,29	1,34	1,26	-1,63	11,48
C4	61 - 85	101,28	56,79	141,98	84,83	2,43	1,31	0,64	10,14
C6	108 - 117	67,62	40,66	73,85	57,62	5,15	1,24	2,78	10,35
P18 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 15	98,76	77,53	94,26	92,39	-0,55	0,27	-0,62	15,17
C3	57 - 74	27,94	19,75	35,32	48,49	3,26	2,17	5,56	16,91
P19 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 10	87,61	86,52	86,39	86,43	1,51	-0,40	1,88	10,57
C5	70 - 85	94,40	74,86	99,36	97,51	1,77	1,65	6,37	14,33
P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 5	96,17	83,18	90,45	83,49	2,76	1,25	8,70	10,89
C4	75 - 103	88,86	49,51	101,71	96,49	4,24	1,41	3,20	11,77
P21 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico									
A	0 - 13	164,32	166,08	103,32	81,47	-0,42	0,39	2,89	20,67
C4	37 - 55	153,64	158,47	131,61	68,56	2,87	-0,38	1,23	9,81
C7	105 - 150	27,46	16,37	23,34	20,14	0,76	4,65	7,08	31,82
P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico									
A	0 - 25	158,52	125,90	95,26	79,17	0,78	0,43	-3,92	19,32
C4	63 - 130	57,22	48,43	66,38	53,87	1,42	8,51	1,80	9,75

Mesmo que os minerais ferrimagnéticos não se mostraram presente nestes solos pela difratometria de raios-X, a medida da χ_{BF} indicou a presença desta característica, sendo esta expressão magnética devida possivelmente a substituição isomórfica de Fe por Ti na estrutura da magnetita condicionando sua permanência em pequenas quantidades (Ker, 1995) e pelos teores de metais pesados presentes, no qual o Fe^{3+} pode ser parcialmente substituído por Cr e V, e o Fe^{2+} por Ni, Co, Zn e Mn. Assim, diversos autores afirmam a forte correlação entre suscetibilidade magnética e os teores de metais pesados (Lu & Bai, 2006; Morton-Bermea et al., 2009; Karimi et al., 2011).

Para os Neossolos Flúvicos (Quadro 24) a suscetibilidade magnética (χ_{BF}) se mostrou com valores relativamente superiores aos dos solos da bacia do rio Doce, variando de 27,84 a 659,61 $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$ para a fração TFSA. Estes mais altos valores são devidos à presença dos minerais ferrimagnéticos na fração areia e silte desses solos (Resende et al., 1988; Ker, 1995; Fontes et al., 2000) como a magnetita (Fe_3O_4) e a transformação deste em Ilmenita ($FeTiO_3$) e ou titanomagnetita pela substituição isomórfica de Fe por Ti, como pode ser observado no difratograma da magnetita separada com um ímã nos sedimentos ao longo do rio Doce (Figura 19). A presença destes minerais ferrimagnéticos nos Neossolos Flúvicos e sedimentos do rio Doce é proveniente de materiais máficos advindos da região do quadrilátero ferrífero pelo o rio do Carmo (CPRM, 2005). Isto deixa claro a influência deste afluente na dinâmica dos sedimentos da bacia do rio Doce, uma vez que nos solos desta bacia não foi observada a presença de minerais ferrimagnéticos.

O valor da suscetibilidade magnética é dependente da concentração dos minerais ferrimagnéticos dentro de uma amostra, embora também seja sensível ao tamanho da partícula magnética (Dearing, 1999; Lu & Bai, 2006). Assim tem-se as partículas superparamagnéticas com apenas um domínio magnético correspondente as frações menores que 1 μm e as partículas de multidomínios magnéticos com partículas maiores que 1 μm , como a magnetita (Dearing, 1999). A presença de partículas superparamagnéticas ou de multidomínios foram observadas avaliando a frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética por unidade de massa dos solos e Neossolos Flúvicos (Quadro 23 e 24). Segundo Dearing (1999), valores de $\chi_{FD} < 2 \%$ indicam a presença predominante de minerais de grãos de multidomínios; χ_{FD} entre 2 e 10 % uma

mistura de partículas multdomínios e superparamagnéticas e χ_{FD} entre 10 e 14 % indicam predomínio de partículas superparamagnéticas.

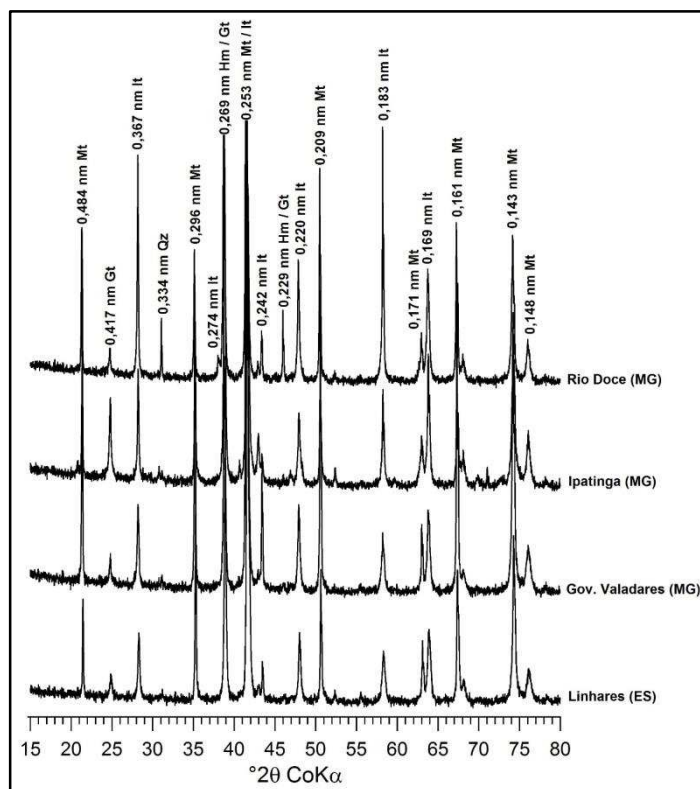


Figura 19. Difratoograma da fração magnética coletada com imã nos sedimentos ao longo do rio Doce. Mt – magnetita; It – Ilmenita; Hm – hematita; Gt – goethita; Qz – quartzo.

Assim, avaliando a frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética se observou uma alta variabilidade entre as frações analisadas (TFSA, areia, silte e argila). Para os solos, seus valores variaram de 4,53 a 16,91 % para a fração TFSA, evidenciando a maior participação de partículas superparamagnéticas em oposição aos Neossolos Flúvicos que apresentou uma maior participação de partículas de multidomínios como a magnetita com valores variando de 0,24 a 4,24 % (Quadro 23 e 24), pelo fato de apresentarem valores de χ_{BF} semelhantes em alta e baixa frequência (Hu et al., 2007). Para os solos, este parâmetro se mostrou com a mesma tendência de valor para todas as frações analisadas. Para os Neossolos Flúvicos, os valores inferiores a 2 % indicando a presença da magnetita, uma partícula multidomínio, foi observado nas frações grosseiras (TFSA, areia e silte) enquanto na fração argila os valores variaram de 9,09 a 31,82 %, indicando a pouca participação dos minerais ferrimagnéticos.

Quadro 25. Correlação de Person entre os teores de Metais Pesados, Fe e suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e de frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética dos solos da bacia do rio Doce.

	TF	AR	S	A	TF	AR	S	A	Fe	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb
	 χ_{BF}				 χ_{FD}				 $\mu\text{g g}^{-1}$											
TF	1,00																			
AR	0,60	1,00																		
Si	0,77	0,74	1,00																	
A	0,93	0,48	0,70	1,00																
TF	0,57	0,09	0,33	0,54	1,00															
AR	0,11	-0,17	0,13	0,15	0,17	1,00														
Si	0,37	0,06	-0,03	0,32	0,13	0,31	1,00													
A	0,05	-0,17	0,18	-0,01	0,34	0,22	-0,25	1,00												
Fe	0,71	0,47	0,35	0,63	0,29	-0,11	0,38	-0,26	1,00											
V	0,57	0,43	0,31	0,49	0,11	-0,04	0,37	-0,05	0,84	1,00										
Cr	0,48	0,78	0,45	0,37	-0,11	-0,24	0,19	-0,24	0,67	0,79	1,00									
Co	0,59	0,52	0,21	0,57	0,24	-0,03	0,36	-0,16	0,75	0,67	0,59	1,00								
Ni	0,46	0,59	0,23	0,40	-0,07	-0,16	0,39	-0,27	0,73	0,87	0,91	0,73	1,00							
Cu	0,50	0,56	0,25	0,45	0,00	-0,09	0,38	-0,26	0,80	0,92	0,87	0,78	0,97	1,00						
Zn	0,29	0,25	-0,12	0,29	0,06	-0,07	0,49	-0,23	0,66	0,65	0,54	0,74	0,75	0,76	1,00					
As	-0,03	-0,23	-0,20	0,15	0,13	-0,12	0,15	-0,07	-0,01	-0,09	-0,08	-0,08	-0,01	-0,09	0,26	1,00				
Mo	-0,50	0,02	-0,09	-0,56	-0,12	-0,12	-0,57	0,31	-0,45	-0,25	-0,10	-0,33	-0,24	-0,25	-0,45	-0,27	1,00			
Cd	-0,27	0,38	0,07	-0,30	-0,37	-0,25	-0,28	-0,35	-0,19	-0,26	0,18	-0,15	-0,04	-0,10	-0,06	-0,02	0,33	1,00		
Ba	-0,17	-0,28	-0,56	-0,02	-0,05	-0,20	0,24	-0,30	0,21	0,02	-0,10	0,43	0,20	0,19	0,58	0,44	-0,33	-0,16	1,00	
Pb	-0,38	-0,55	-0,70	-0,34	-0,30	-0,22	0,25	-0,34	0,02	-0,12	-0,36	0,06	-0,09	-0,06	0,19	-0,02	-0,27	-0,23	0,69	1,00

TF – Terra Fina Seca ao Ar; AR – Areia; S – Silte; A – Argila. Correlação significativa a p=1% e 5% marcados em negrito.

Quadro 26. Correlação de Person entre os teores de Metais Pesados, Fe e suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e de frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética dos Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce.

	TF	AR	S	A	TF	AR	S	A	Fe	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb
	 χ_{BF}				 χ_{FD}				 $\mu\text{g g}^{-1}$											
TF	1,00																			
AR	0,98	1,00																		
Si	0,95	0,94	1,00																	
A	0,75	0,73	0,80	1,00																
TF	-0,47	-0,46	-0,45	-0,32	1,00															
AR	-0,38	-0,37	-0,37	-0,43	0,15	1,00														
Si	-0,21	-0,20	-0,18	-0,16	0,30	0,32	1,00													
A	-0,14	-0,19	-0,18	-0,02	-0,26	0,17	0,27	1,00												
Fe	0,07	0,15	0,14	-0,10	0,24	0,39	0,20	-0,36	1,00											
V	-0,35	-0,29	-0,30	-0,43	0,44	0,58	0,34	-0,16	0,88	1,00										
Cr	0,09	0,17	0,18	0,07	0,20	0,32	0,09	-0,38	0,89	0,73	1,00									
Co	0,04	0,08	0,00	-0,15	0,42	0,30	0,24	-0,34	0,61	0,55	0,54	1,00								
Ni	-0,18	-0,09	-0,13	-0,28	0,17	0,42	0,26	-0,03	0,87	0,87	0,80	0,43	1,00							
Cu	-0,24	-0,17	-0,19	-0,35	0,40	0,50	0,26	-0,24	0,92	0,97	0,81	0,61	0,90	1,00						
Zn	-0,45	-0,41	-0,37	-0,36	0,63	0,52	0,42	-0,20	0,65	0,83	0,62	0,51	0,62	0,80	1,00					
As	0,41	0,44	0,53	0,43	-0,21	-0,14	-0,12	-0,16	0,34	0,06	0,41	0,02	0,19	0,12	-0,19	1,00				
Mo	-0,14	-0,15	-0,22	-0,08	-0,23	-0,09	-0,07	0,34	-0,39	-0,33	-0,16	-0,31	-0,03	-0,30	-0,26	-0,15	1,00			
Cd	-0,59	-0,58	-0,60	-0,45	0,18	0,35	0,08	0,27	0,15	0,43	0,07	-0,13	0,42	0,35	0,37	-0,11	0,10	1,00		
Ba	-0,36	-0,33	-0,24	0,00	0,55	-0,11	0,09	-0,30	-0,09	-0,04	0,05	0,02	-0,14	-0,06	0,34	-0,15	-0,07	0,01	1,00	
Pb	-0,56	-0,52	-0,50	-0,52	0,54	0,70	0,47	-0,08	0,65	0,88	0,54	0,49	0,68	0,81	0,91	-0,18	-0,23	0,53	0,16	1,00

TF – Terra Fina Seca ao Ar; AR – Areia; S – Silte; A – Argila. Correlação significativa a p=1% e 5% marcados em negrito.

Para melhor se avaliar a suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e a frequência dependente (χ_{FD}) da suscetibilidade magnética, correlações entre estes e os teores de metais pesados foram realizadas. Uma vez que uma análise conjunta dos dados químicos e magnéticos tem se apresentado com uma estreita relação entre a χ_{FD} e metais pesados em partículas atmosféricas, sedimentos marinhos e fluviais (Shu et al., 2001) (Chan et al., 1998; Desenfant et al., 2004) e solos (Petrovsky et al., 2001).

Avaliando-se a correlação de Pearson entre os teores de Fe, metais pesados e a suscetibilidade magnética (χ_{BF}) para os solos (Quadro 25) da bacia do rio Doce foi possível visualizar correlação linear positiva entre a χ_{BF} da fração TFSA e Areia com os teores de Fe, V, Cr, Co, Ni e Cu e da fração argila com Fe, V, Co e Cu. Também se observou correlação positiva entre o Fe e o V, Cr, Co, Ni, Cu e Zn. Este fato sugere que os metais pesados V, Cr, Co, Ni e Cu estão adsorvidos ou substituindo o Fe na estrutura dos minerais ferrimagnéticos das frações mais grosseiras, mesmo que estejam em pequenas quantidades não sendo possível sua identificação pela difratometria de raios-X (Dearing et al., 1985; Resende et al., 1986; Ker, 1995; Fontes et al., 2000; Kukier et al., 2003; Lu et al., 2008; Morton-Bermea et al., 2009). Uma vez que a formação de minerais magnéticos por intemperismo pedogênico é igualmente dependente do tempo e da relação positiva entre a suscetibilidade magnética e a idade do perfil (Dering et al., 1985; Dering, 1999). Para Zn, As, Cd, Ba e Pb não houve correlação significativa com a suscetibilidade magnética para os solos estudados.

Para os Neossolos Flúvicos não se observou correlação entre a suscetibilidade magnética (χ_{BF}) e os teores de Fe e metais pesados (Quadro 26), com exceção da correlação positiva do As com a χ_{BF} de todas as frações analisadas, indicando que os minerais magnéticos presentes, tais como magnetita e titanomagnetita possam contribuir como uma importante fonte de As, uma vez que este mineral é uma das mais importantes fontes de metais pesados no solo (Resende et al., 1986; Ker, 1995; Fontes et al., 2000; Kampf & Curi, 2000)

Os valores da correlação de Pearson entre V, Cr, Co, Ni, Cu e Zn (Quadro 25 e 26) para solos e Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce mostrou correlação linear positiva entre eles, sugerindo uma mesma fonte de contaminação. Para a área de estudo, essa fonte é o próprio material de origem,

considerando que os teores destes metais para os solos deste trabalho estão sendo utilizados como fundo geoquímico natural para a bacia do rio Doce.

4.5. Atributos mineralógicos

4.5.1. Mineralogia da fração argila

Pela difratometria de raios-X da fração argila dos solos, solos aluvias e sedimentos da bacia do rio Doce foi possível observar uma similaridade na mineralogia desses materiais, sendo constituída basicamente por vermiculita, vermiculita com hidróxi entrecamada, illita, caulinita, gibbsita, goethita e hematita (Figura 20 a 31).

Esta composição mineralógica apresentou-se com algumas variações nos solos desta bacia de acordo com sua classe. A presença de vermiculita, vermiculita com hidróxi entrecamada e illita, identificados pelos picos 1,410; 1,222 e 1,009 nm, respectivamente, foi detectada apenas nos Cambissolos (P7 e P11). O P7 se encontra na região de Resplendor (MG) formado por granitóides (CPRM, 2003) e o P11 na região de Linhares (ES) por sedimentos quaternários da formação Barreiras (CPRM, 2013). A gibbsita mostrou presença marcante pelos picos em 0,484 e 0,435 nm nos Latossolos Vermelhos e Amarelos (P1, P2, P5) e nos Cambissolos (P7 e P11) discutidos anteriormente (Figura 20 e 21). Nos Argissolos Vermelhos (P3, P4, P6 e P8) e os Latossolos Amarelos (P9 e P10) a gibbsita se apresentou com picos pouco expressivos. Estes solos não apresentaram minerais 2:1 com exceção do P6 que indicou pico de illita em 0,998 e 0,334 nm (Figura 20).

Assim, a composição mineralógica destes perfis de solos de acordo com sua litologia indicam que os argilominerais formados tiveram sua origem a partir da alteração de plagioclásios, feldspato e muscovita. Os óxidos de ferro originaram-se principalmente a partir de anfibólios e biotita (CPRM, 2003; Bilal et al., 2000; CPRM 2013; Uhlein et al., 2013).

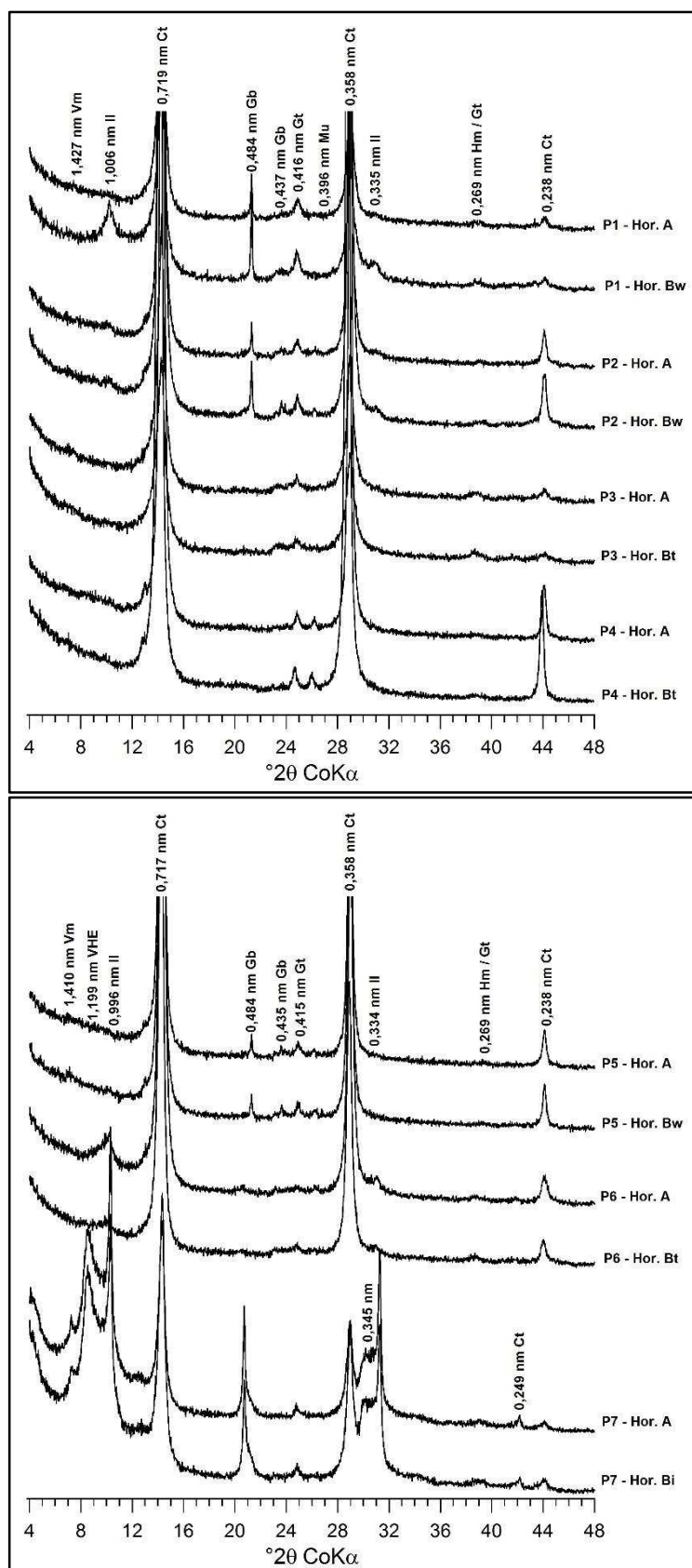


Figura 20. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos solos da parte alta da paisagem (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

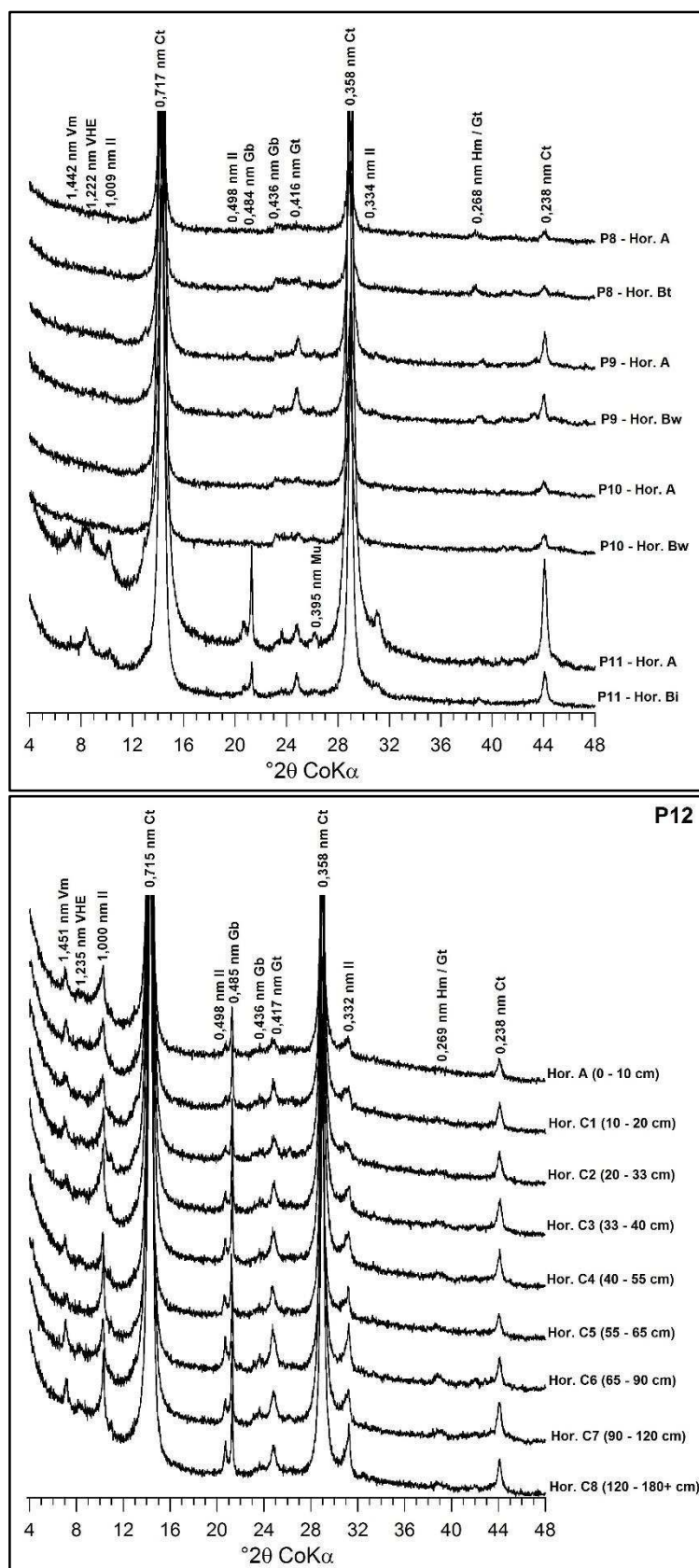


Figura 21. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos solos da parte alta da paisagem (P8, P9, P10 e P11) e do Neossolo Flúvico (P12). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

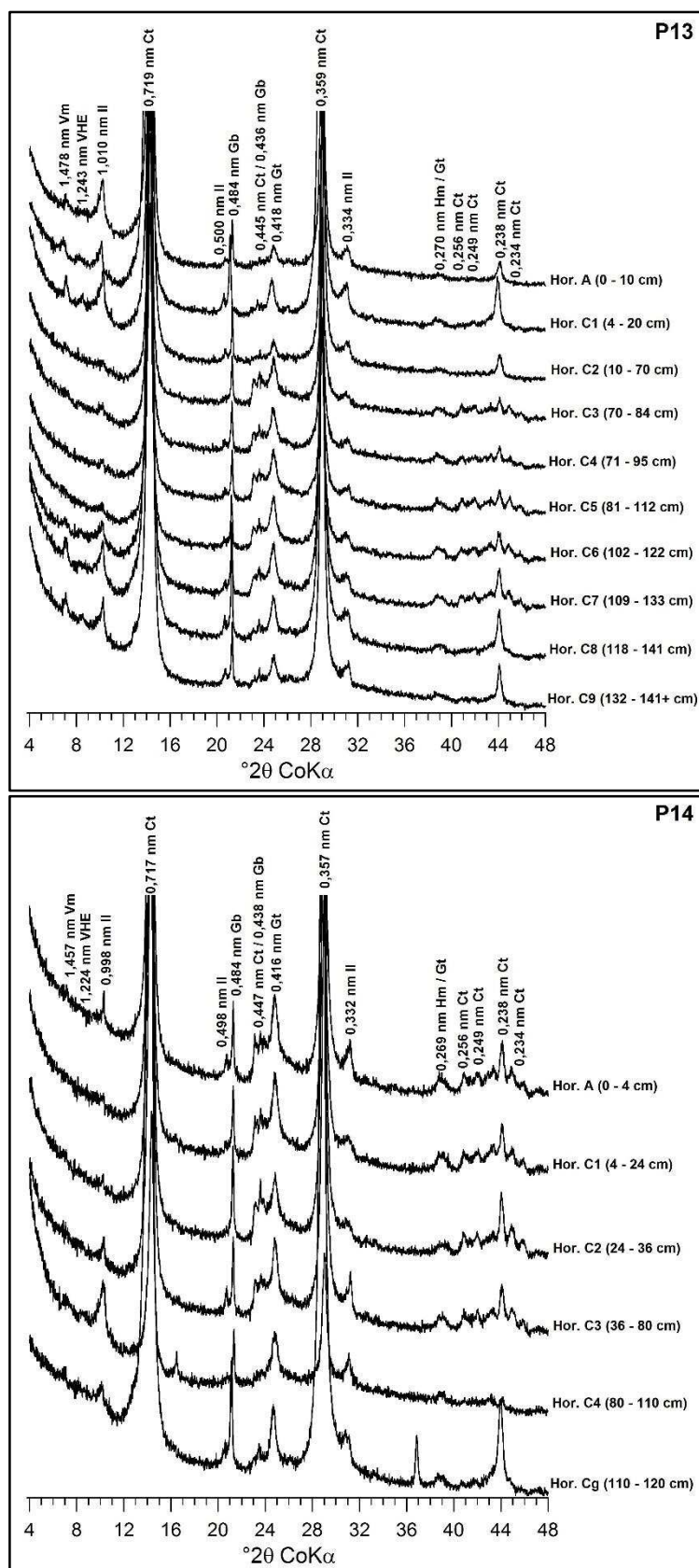


Figura 22. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos Neossolos Flúvicos (P13 e P14). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

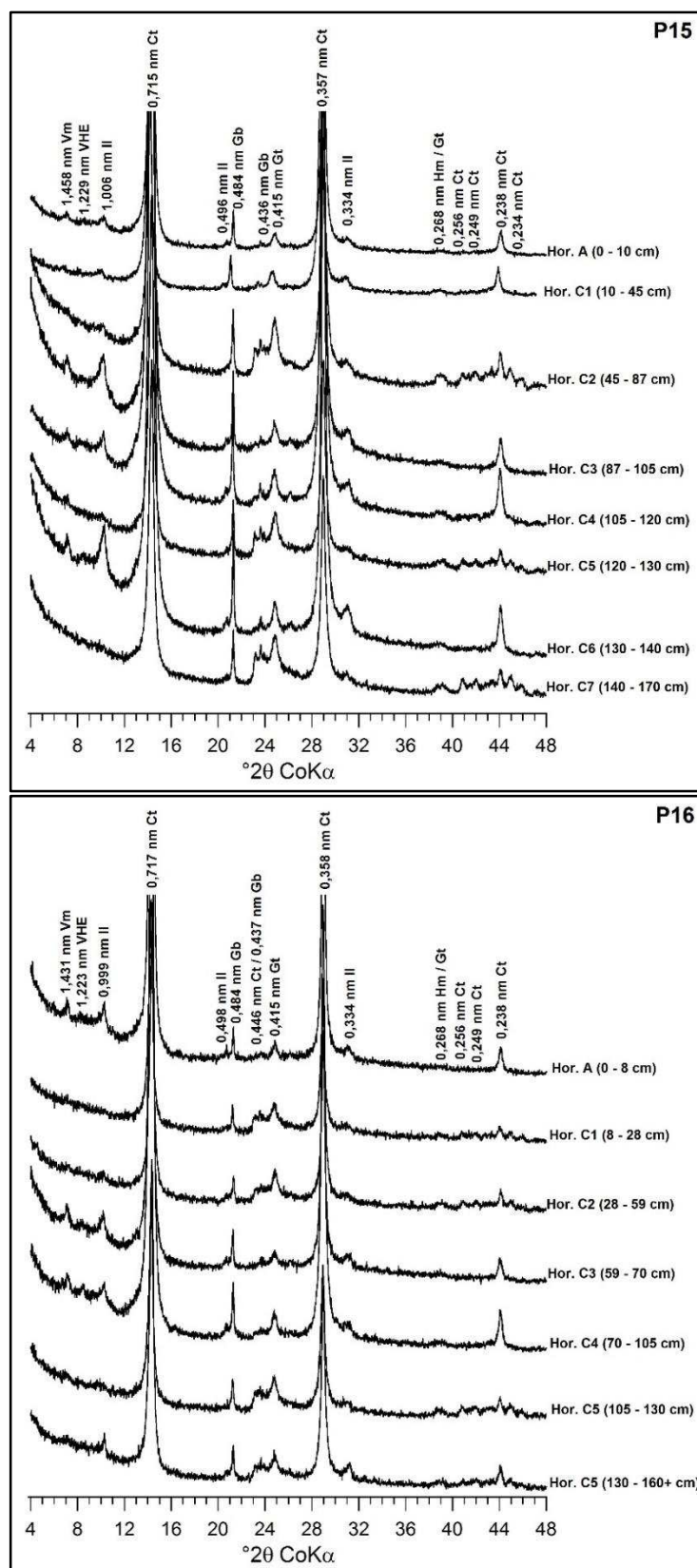


Figura 23. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos Neossolos Flúvicos (P15 e P16). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

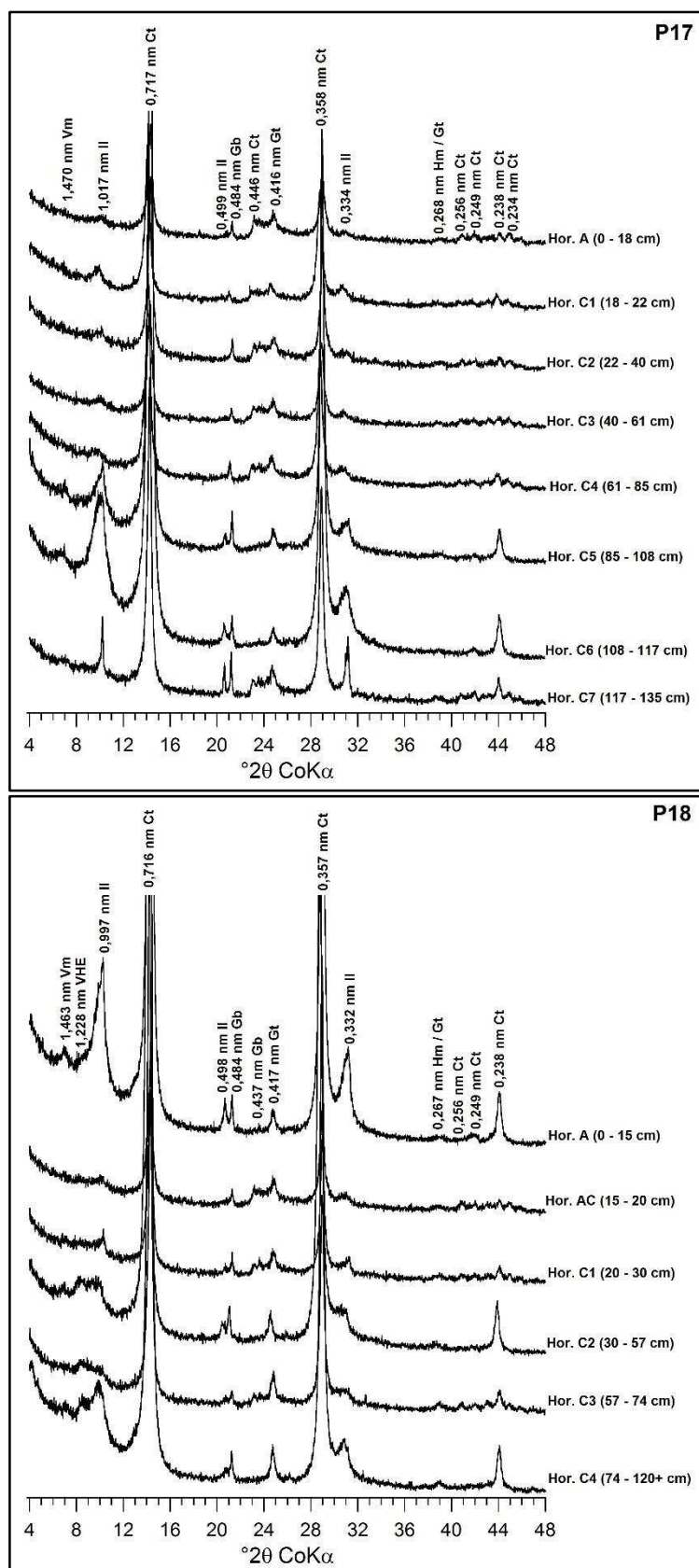


Figura 24. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos Neossolos Flúvicos (P17 e P18). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

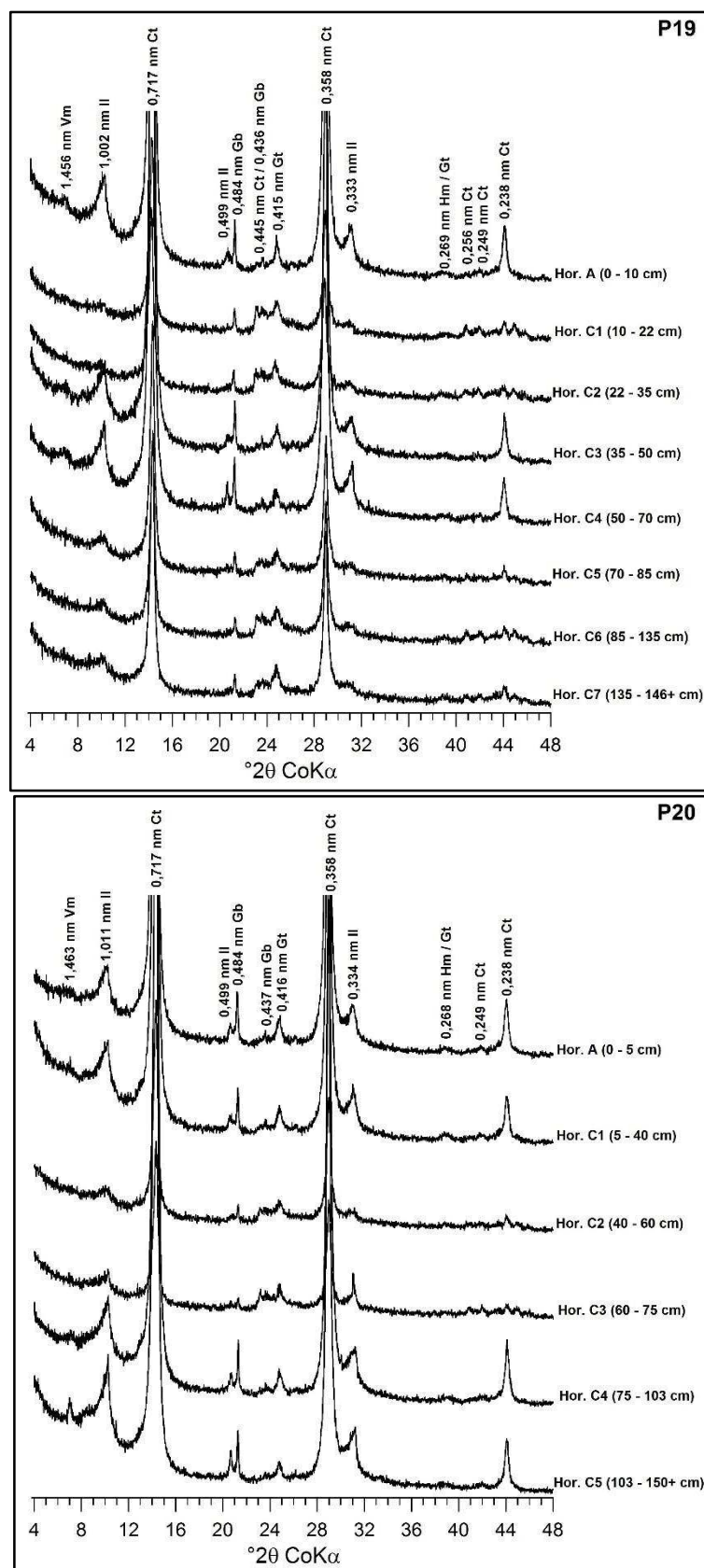


Figura 25. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos Neossolos Flúvicos (P19 e P20). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

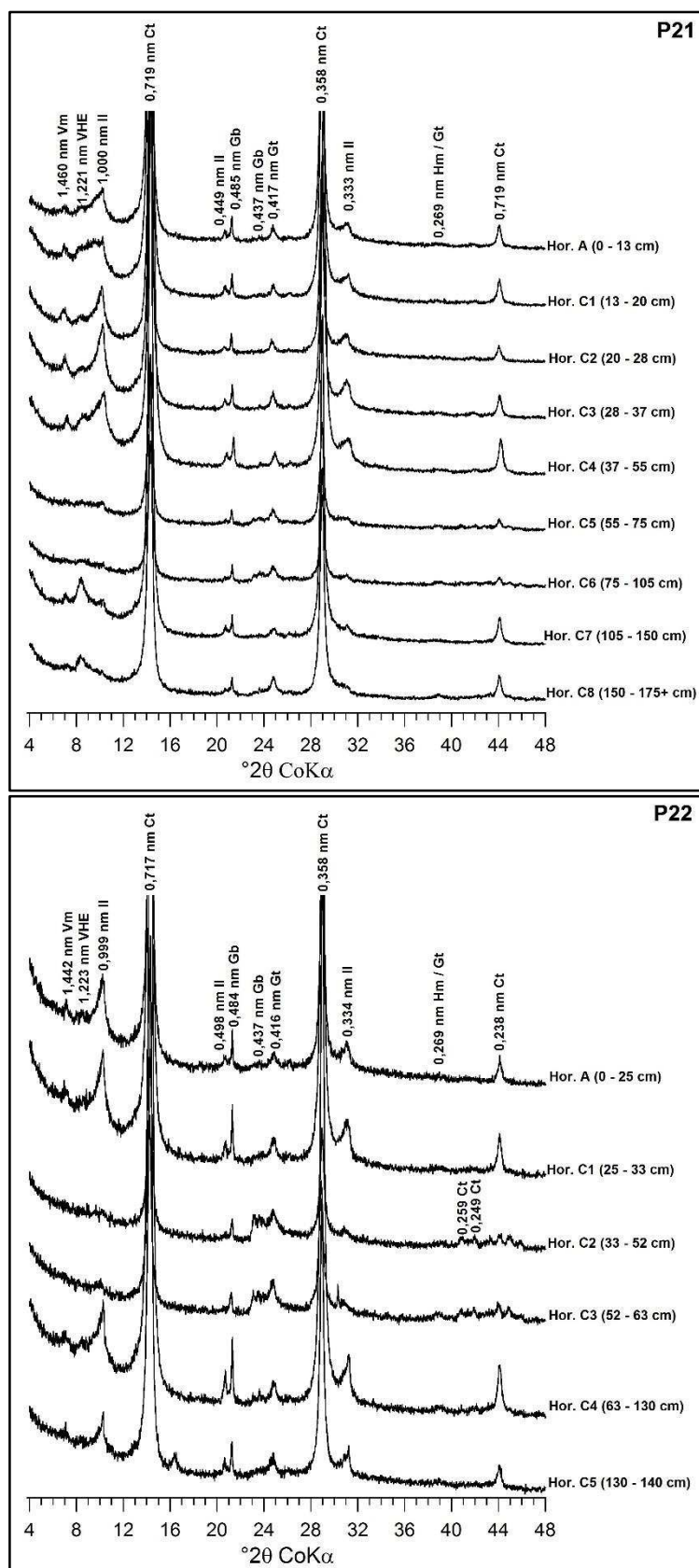


Figura 26. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos Neossolos Flúvicos (P21 e P22). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

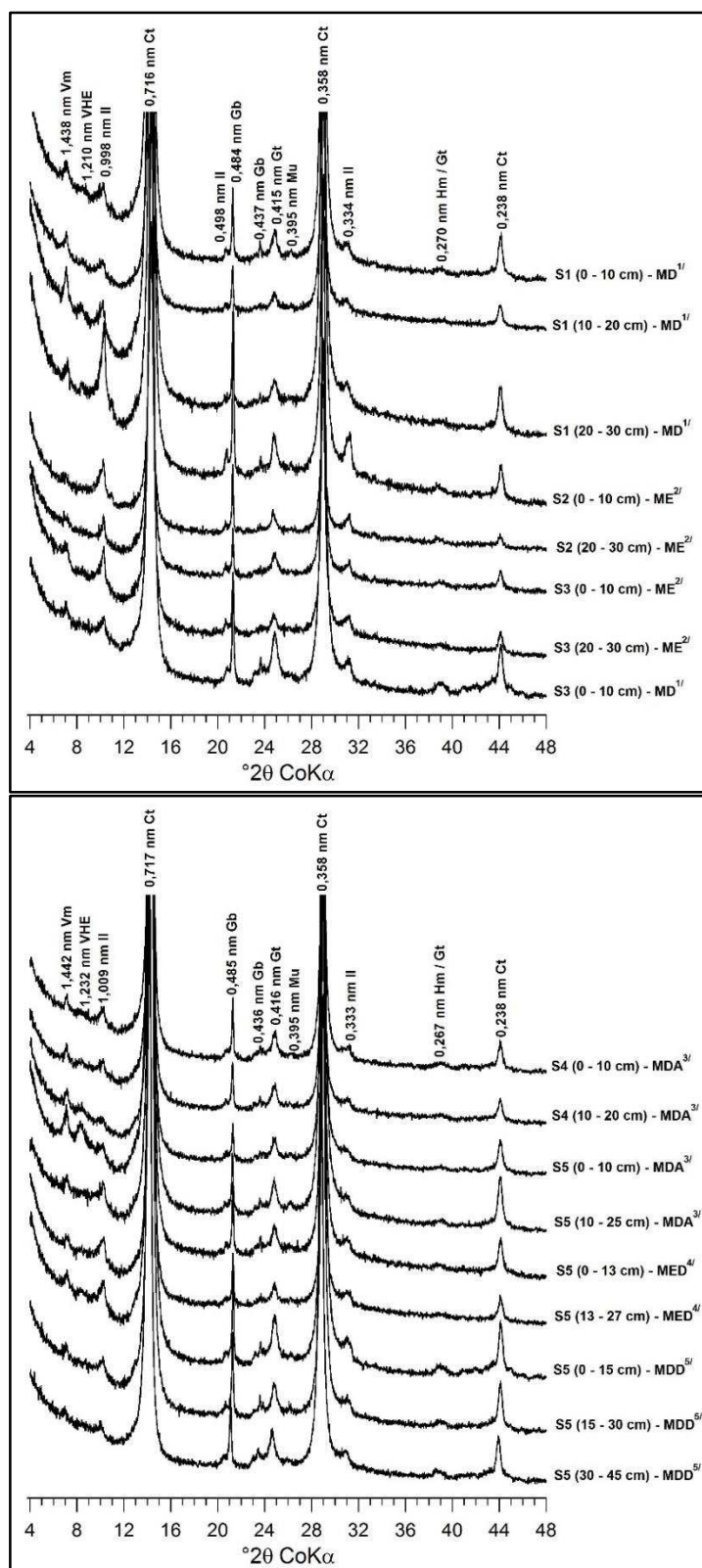


Figura 27. Difratomia de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos sedimentos do rio Doce (S1, S2, S3, S4 e S5). ^{1/}MD: Margem Direita; ^{2/}ME: Margem Esquerda; ^{3/}MDA: Margem Direita Antes; ^{4/}MED: Margem Esquerda Depois; ^{5/}MDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

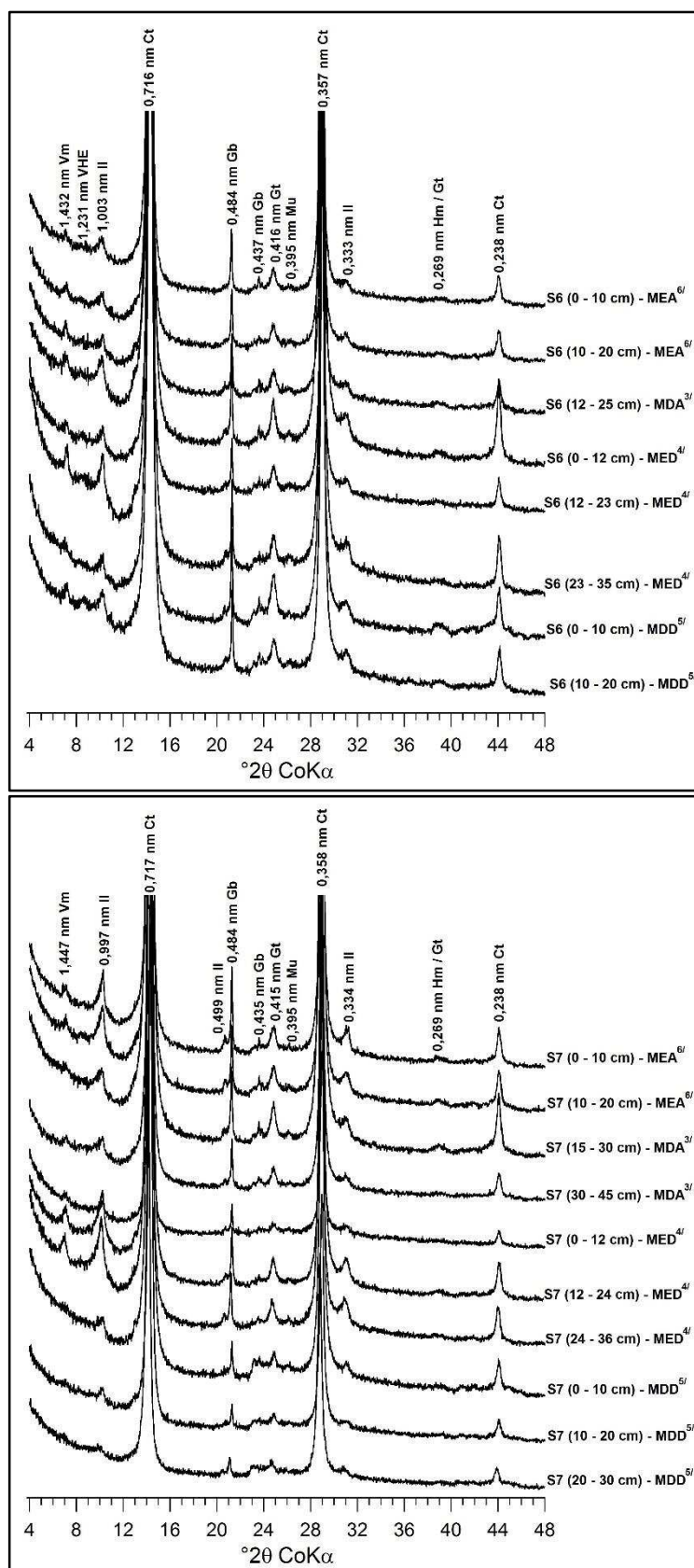


Figura 28. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos sedimentos do rio Doce (S6 e S7). ^{6/}MEA: Margem Esquerda Antes; ^{3/}MDA: Margem Direita Antes; ^{4/}MED: Margem Esquerda Depois; ^{5/}MDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

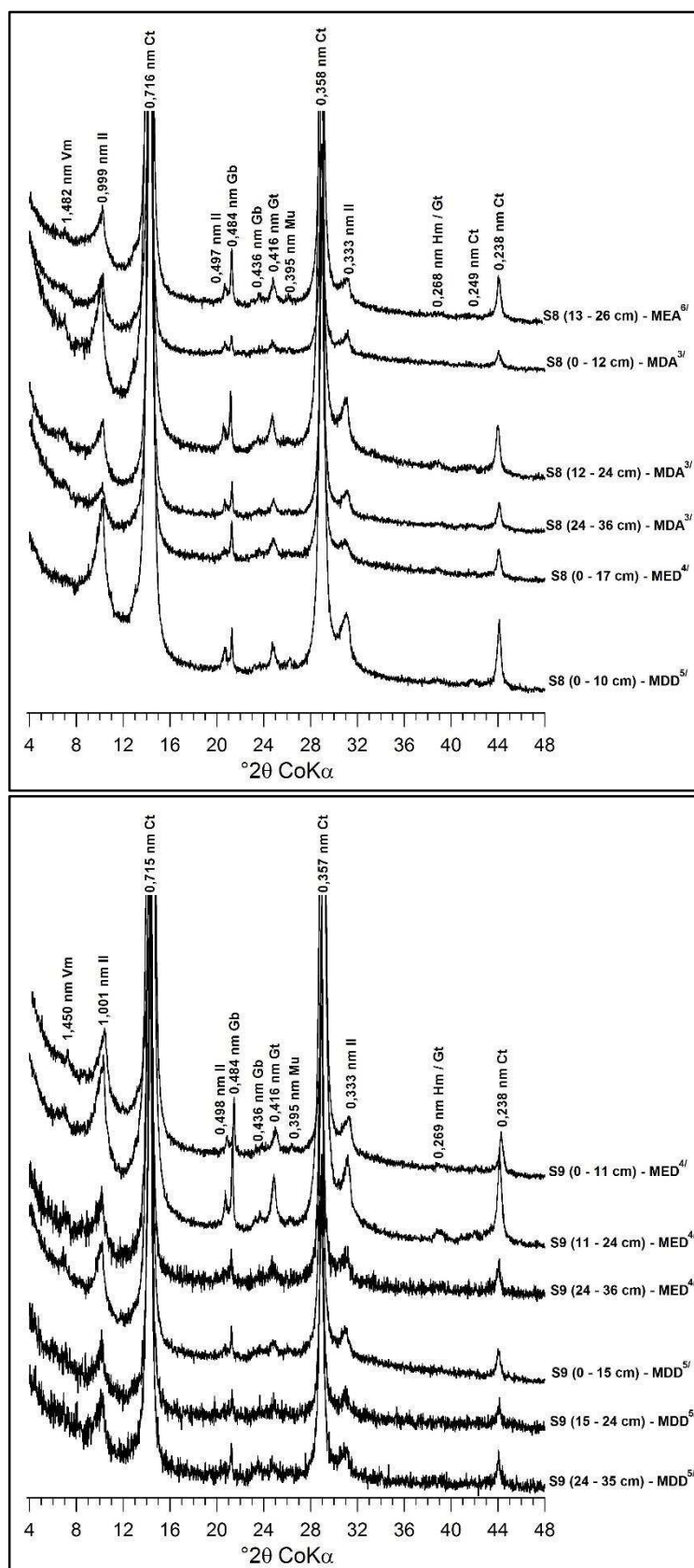


Figura 29. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos sedimentos do rio Doce (S8 e S9).⁶ⁱMEA: Margem Esquerda Antes; ³ⁱMDA: Margem Direita Antes; ⁴ⁱMED: Margem Esquerda Depois; ⁵ⁱMDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

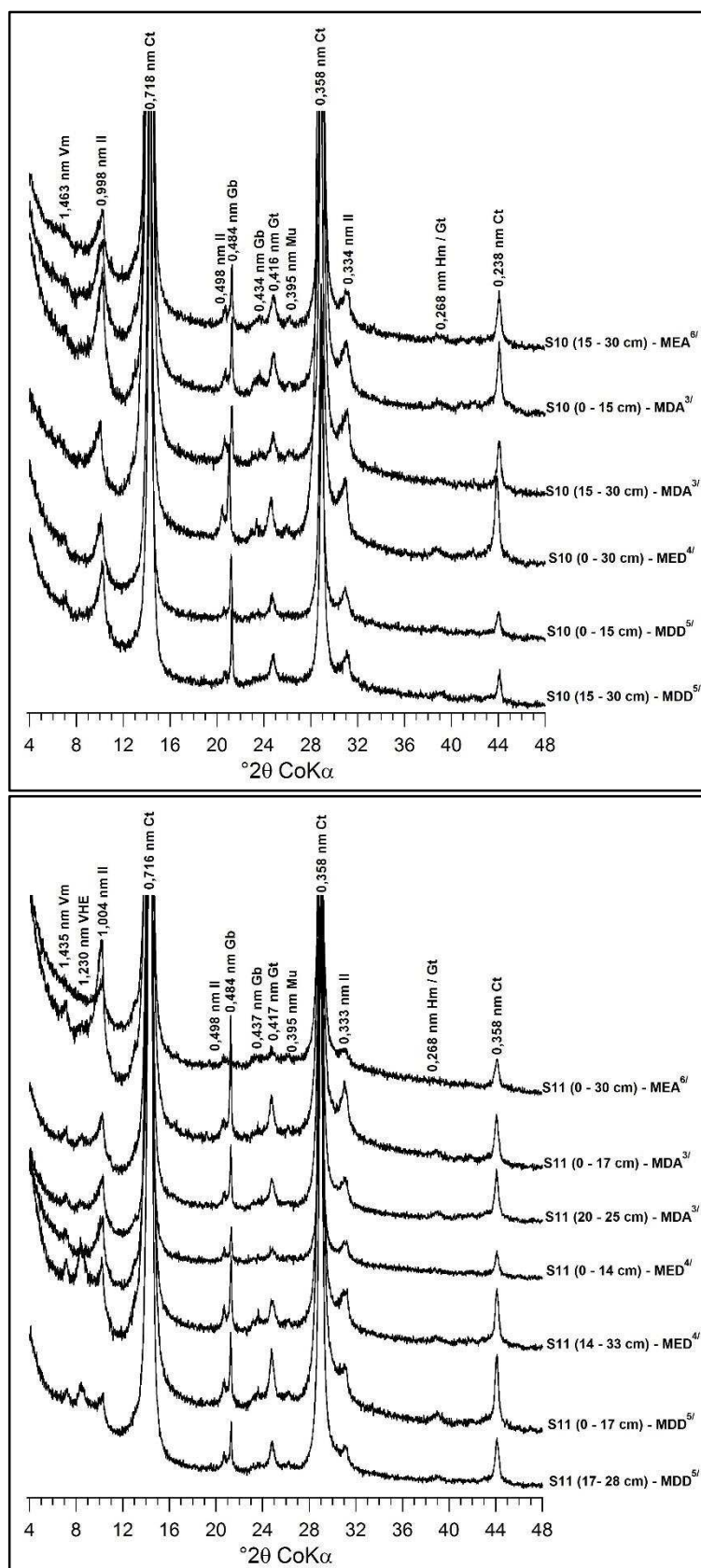


Figura 30. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos sedimentos do rio Doce (S10 e S11).^{6/}MEA: Margem Esquerda Antes; ^{3/}MDA: Margem Direita Antes; ^{4/}MED: Margem Esquerda Depois; ^{5/}MDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

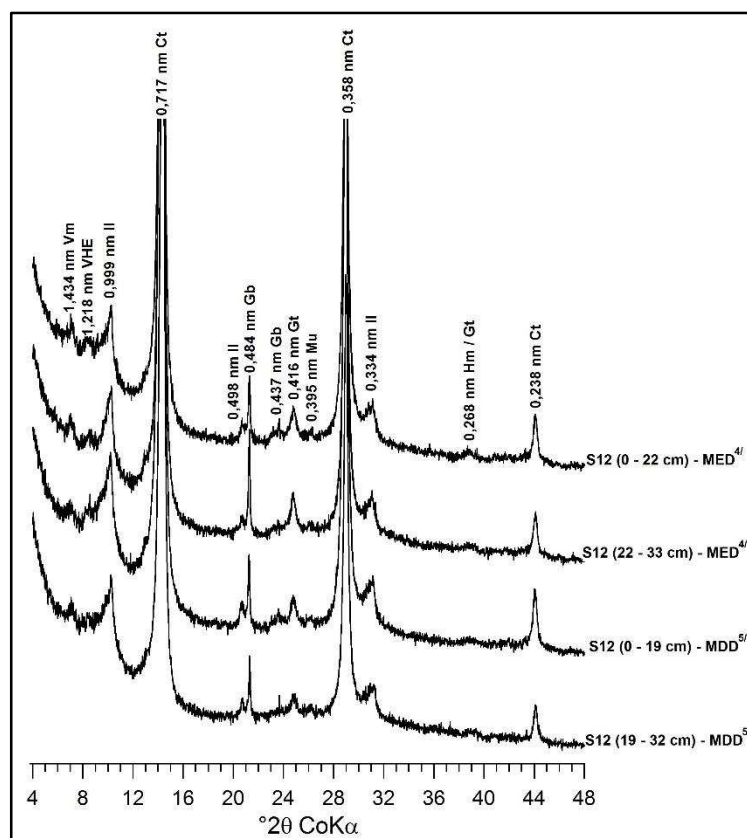


Figura 31. Difratometria de raios-X da fração argila natural (amostra orientada) dos sedimentos do rio Doce (S12).⁶/MEA: Margem Esquerda Antes; ³/MDA: Margem Direita Antes; ⁴/MED: Margem Esquerda Depois; ⁵/MDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

A presença marcante da caulinita, e parcial da gibbsita, na fração argila dos solos é indicativa de um grau elevado de desenvolvimento. Este é condicionado pela remoção de sílica, devido à sua maior solubilidade, resultando na formação de caulinita e com a continuidade do processo a conversão desta em gibbsita (Lindsay, 1979; Hsu et al., 1989). Esta transformação foi observada nos Latossolos Vermelho e Amarelo (P1, P2 e P5) como também no Argissolo Vermelho (P6) e Cambissolos (P7 e P11). Avaliando o teor total de Fe pela fluorescência de raios-X, a cor do solo e a presença ou ausência da gibbsita nos solos, não se observou uma correlação entre eles, onde a cor do solo não é função do teor de ferro presente e sim do seu tipo de óxido de ferro presente, igualmente mostrado por Kämpf & Schwertmann (1983).

Avaliando os difratogramas da argila tratada com NaOH para a concentração de óxidos (Apêndice B) se observa a presença da goethita, com picos em 0,416 e 0,269 nm, e hematita, com picos em 0,251 e 0,269 nm, nos

solos em estudo (P1 a P11) com seus respectivos hkl em 110 e 111. Mesmo em diferentes proporções, esses óxidos de ferro se fazem presentes em todos os solos estudados da bacia do rio Doce tanto nas cores 7,5YR ou mais amarelos (P2, P5, P7, P9, P10 e P11) ou 2,5YR ou mais vermelhos (P1, P3, P4, P6 e P8). A presença da hematita, mesmo nos solos vermelhos (Apêndice B), se deve à sua maior estabilidade termodinâmica dentre os óxidos de Fe, precipitando em menor constante de solubilidade ($10^{-44} < K_{ps} < 10^{-41}$) (Cornell & Schwertmann, 2003; Kampf & Curi, 2000; Mello & Perez, 2009). Estes minerais podem coexistir por apresentarem características distintas, como as mineralógicas (como nível de substituição isomórfica de Fe por Al na estrutura, grau de cristalinidade, tamanho e forma do mineral), material de origem, estágio de intemperismo e condições biopedoclimáticas do seu local de formação (Resende, 1976; Melo et al., 2001).

Os Neossolos Flúvicos avaliados na bacia do rio Doce foram formados por depósitos quaternários aluviais (CPRM, 2003; CPRM, 2013). Pelo seu caráter aluvial de formação pela estratificação em camadas, a composição mineralógica desses solos são reflexos dos minerais presentes nas rochas desta bacia que por erosão ou carreamento pelos seus afluentes chegaram ao rio principal e por processo de sedimentação formaram suas planícies aluviais. Avaliando os difratogramas da fração argila natural (Figura 21 a 31) e da concentração de óxidos (Apêndice B) dos Neossolos Flúvicos (P12 a P22) e sedimentos (S1 a S12) sua composição mineralógica foi de vermiculita, vermiculita com hidróxi-entrecamada, ilita, caulinita, gibbsita, goethita e hematita.

Os difratogramas da fração argila dos Neossolos Flúvicos e sedimentos apresentaram picos em 0,717; 0,258; 0,238 nm, característicos das reflexões 001, 002 e 003 da caulinita, mineral este facilmente observado nos difratogramas da fração argila natural (Figura 21 a 31) e da fração argila desferrificada (Apêndice A). Pela maior condição de umidade nesses ambientes, estes apresentaram cor 7,5YR ou mais amarelos resultando na predominância do mineral goethita com picos em 0,416; 0,269 nm (Apêndice A) por sua maior estabilidade termodinâmica dentre os óxidos de ferro (Cornell & Schwertmann, 2003; Kampf & Curi, 2000; Mello & Perez, 2009).

A gibbsita apresentou seus picos em 0,485 e 0,435 nm em todos os Neossolos Flúvicos e sedimentos avaliados. Como nesses ambientes a drenagem é facilitada pela maior proporção da fração areia, uma maior

dessilificação propícia a formação deste mineral (Lindsay, 1979; Hsu et al., 1989).

Para a correta identificação dos minerais 2:1 se procedeu na fração argila sua saturação com Mg e Mg + Glicerol, K a 25, 350 e 550 °C (Figura 32 e 33). Observou-se que com a saturação com Mg e Mg + Glicerol que o pico com reflexão basal a 1,4 nm não sofreu qualquer alteração, excluindo a possibilidade de ser o mineral esmectita que sofreria com este tratamento uma expansão de sua distância interbasal até 1,8 nm (Douglas, 1989). Nos diferentes tratamentos com K e aquecimento, foi possível observar o colapso do pico de 1,4 nm para 1,0 nm onde é detectada naturalmente a ilita, sendo portanto a confirmada a identificação da vermiculita. Pela presença da vermiculita e a presença do pico em 1,2 nm e seu comportamento frente aos tratamentos, se pode afirmar a presença de vermiculita com hidróxi-entrecamada. Uma maior atividade de Al no sistema induz a formação deste mineral em solos ácidos pelo aumento da instabilidade dos aluminossilicatos (Fanning & Keramidas, 1989; Douglas, 1989) conferindo uma maior resistência à vermiculita (Ker, 1988; Resende et al., 2005).

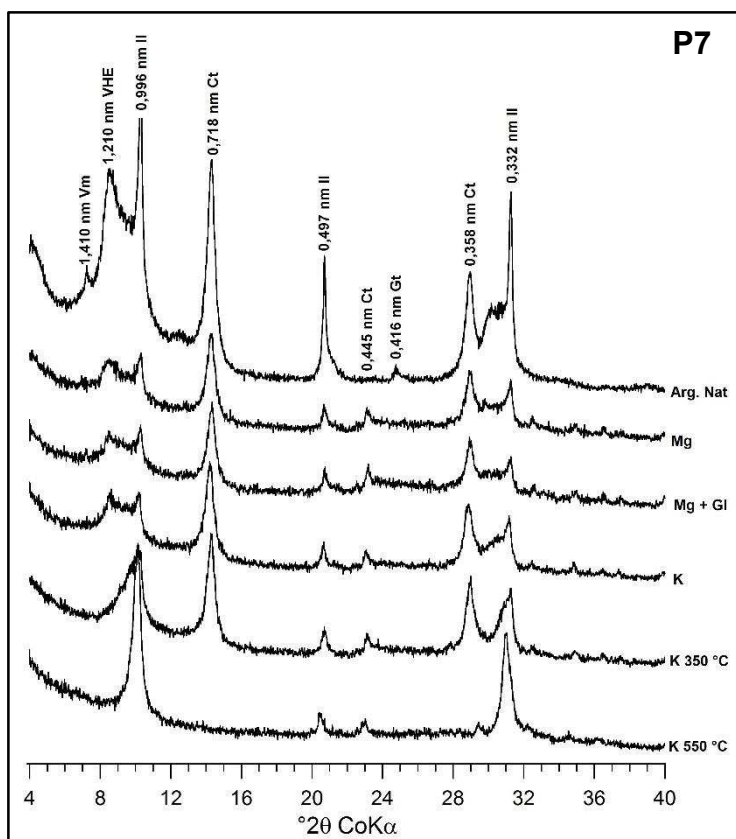


Figura 32. Difractometria de raios-X da fração argila natural dos tratamentos para identificação dos minerais 2:1 no horizonte Bi do Cambissolo Háplico (P7). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Il – ilita; Ct – Caulinita; Gb – gibbsite; Gt – goethite.

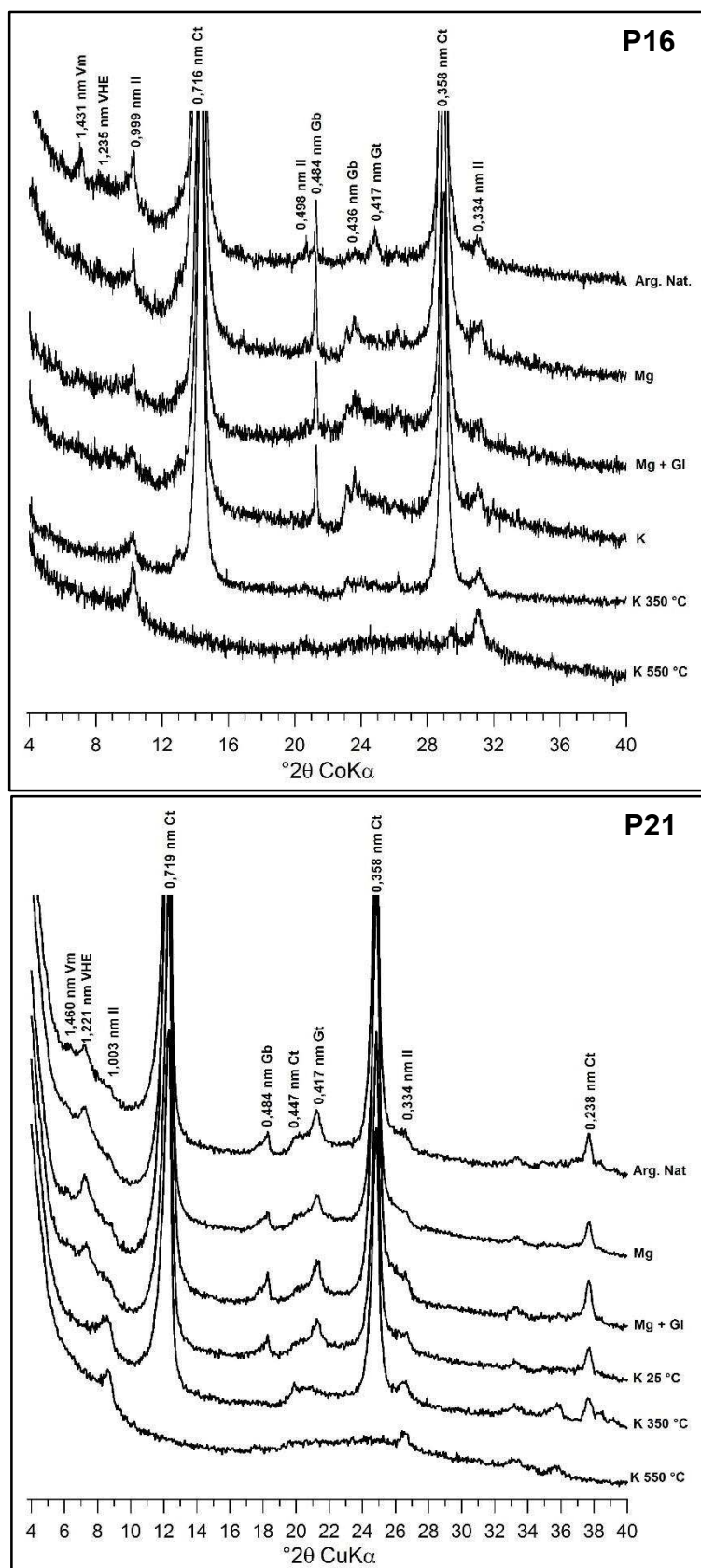


Figura 33. Difratometria de raios-X da fração argila natural dos tratamentos para identificação dos minerais 2:1 no horizonte C4 do Neossolo Flúvico (P16) e no horizonte C7 do Neossolo Flúvico (P21). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Il – illita; Ct – Caulinita; Gb – gibbsite; Gt – goethite.

Os picos em 1,00; 0,50; 0,33 nm indicam a presença da illita, um mineral 2:1 hidratado não expansível, observado nos difratogramas da fração argila natural (Figuras 20 a 31). A ocorrência deste mineral aconteceu em todos os Neossolos Flúvicos e sedimentos e em alguns solos (P1, P6, P7 e P11) da bacia em estudo. Nos difratogramas da fração argila desferrificada (Apêndice A) é possível a visualização do pico em 0,395 nm correspondente à muscovita. Sendo um mineral primário bastante resistente ao intemperismo, sua presença na fração argila de solos altamente intemperizados é possível, onde diversos autores já encontraram resíduo desta mica (Arkcoll et al., 1985; Melo et al., 2002; Melo et al., 2003).

Assim, pode-se afirmar que a illita e vermiculita presentes nesses materiais foi formada a partir da muscovita e ou do feldspato, minerais estes presentes no material de origem (CPRM, 2003; Bilal et al., 2000; CPRM 2013; Uhlein et al., 2013). As reflexões basais da illita e muscovita são as mesmas em 1,00; 0,33 e 0,50 nm e diferem em 0,395 sendo este valor apenas para a muscovita. A visualização do pico em 0,395 nm só foi possível no difratograma da fração argila desferrificada (Apêndice A), devido à remoção dos óxidos de ferro e pelo processo de orientação da amostra, ocasionando uma magnificação na intensidade do pico.

Confirmando a participação da muscovita na composição mineralógica dos solos da bacia em estudo, a relação entre a intensidade dos picos 001 e 002 da illita foi muito superior à unidade ($R = (001) / (002) = >1$) em todas as amostras analisadas. Segundo Pal et al. (2001), valores de R próximos de 1,0 indicam a ocorrência de apenas muscovita (mica dioctaedral).

Com a presença de vermiculita, vermiculita com Al-hidrôxi entrecamada e illita, considerando estes relacionados à interestratificação ao acaso da vermiculita-illita e utilizando o método de Mering (Sawhney, 1989) estimou-se esta interestratificação sendo de 95 % de mica e 5 % de vermiculita para os solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos da bacia do rio Doce.

A caulinita foi o mineral mais abundante encontrado na fração argila dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos desta bacia. Assim, para melhor caracterização mineralógica se utilizou um microscópio eletrônico de transmissão acoplado a um detector de energia dispersiva para se obter a morfologia da caulinita do horizonte subsuperficial de um Argissolo Vermelho (P3) e de um Latossolo Amarelo (P10). Em ambos os solos, a forma hexagonal

da caulinita foi observada com suas arestas parcialmente arredondadas pelo processo de intemperismo (Figura 34). Resultados semelhantes foram encontrados por Singh & Gilkes (1992) para solos australianos e Corrêa (2008) para solos dos tabuleiros costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. O EDS acoplado ao microscópio foi utilizado para verificar a composição elementar da caulinita e do óxido de ferro para confirmar sua identificação (Figura 34a). O microscópio eletrônico de transmissão é capaz de gerar uma imagem que possibilita a verificação se o material em estudo é cristalino ou amorfo. Uma imagem com o campo claro é formada pelo feixe direto (Figura 34d) e uma outra com o campo escuro por um feixe difratado (Figura 34e). Assim, pode-se visualizar o efeito da difração gerada pela caulinita.

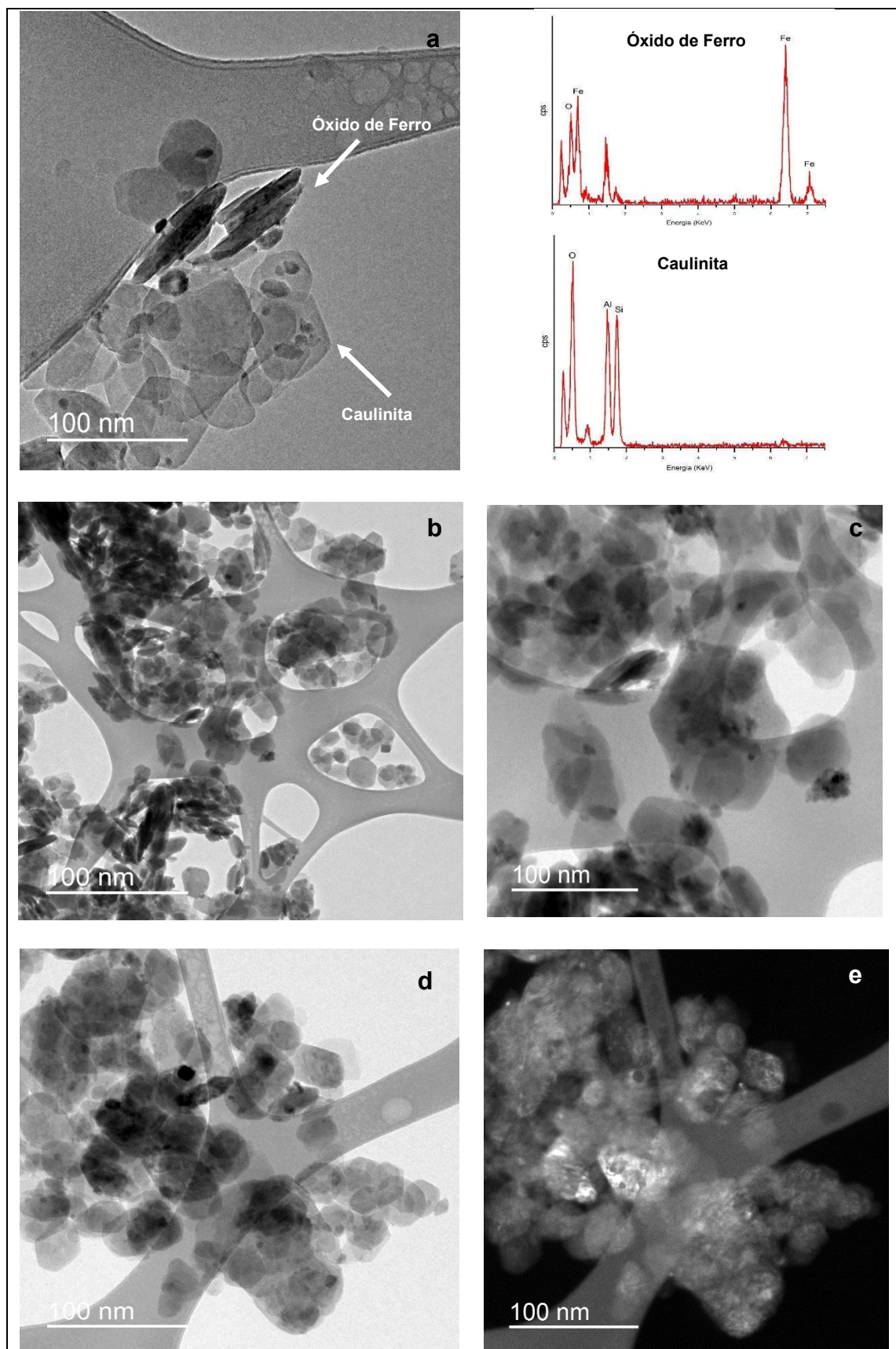


Figura 34. Microscopia eletrônica de transmissão da fração argila natural do horizonte subpuperficial do P3 - Argissolo Vermelho (d;e) e do P10 - Latossolo Amarelo (a;b;c)

4.6. Espectroscopia de absorção de raios-X do cromo

Os teores de Cr avaliados nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos na bacia do rio Doce variaram respectivamente de 26,60 a 388,10; 34,40 a 161,70; 18,20 a 202,10 $\mu\text{g g}^{-1}$. Para solos do mundo, este pode variar de 0,5 a 250 $\mu\text{g g}^{-1}$ (McBride, 1994; Gonnelli & Renella, 2013). Em rochas máficas e ultramáficas seus teores podem variar de 1 a 3000 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Kotas & Stasicka, 2000) e de 5 a 120 $\mu\text{g g}^{-1}$ em rochas ígneas ácidas e sedimentares (Gonnelli & Renella, 2013), correspondente a geologia da área em estudo (CPRM, 2003; CPRM, 2013).

Ao avaliar os teores de Cr presente na bacia do rio Doce, conforme Quadros 16, 17 e 18 vistos anteriormente, observou-se alguns teores acima e outros próximos do fundo geoquímico natural de 152,2 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Quadro 27). O comportamento de transporte e toxicidade do Cr é fortemente dependente de sua valência. O mais comum estado de oxidação no ambiente são o hexavalente e o trivalente. O Cr^{6+} é um oxidante forte e considerado carcinogênico e é solúvel em águas naturais, sendo portanto bastante móvel no ambiente (Bartlett & Kimble, 1976). O Cr^{3+} é comumente encontrado em formas insolúveis de óxidos e (oxi) hidróxidos, exceto em quantidades pequenas, é considerado um nutriente essencial (Alloway, 2013). Desta forma, para se estudar o comportamento deste elemento na bacia do rio doce, se utilizou a X-ray absorption near edge structure spectroscopy (XANES) através da radiação síncrotron para se determinar suas formas e grau de oxidação. Para tal, se estudou 16 amostras de solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos (Quadro 27) distribuídos ao longo da área de estudo (Figura 35).

Para melhor coleta dos dados pela espectroscopia XANES, todas as amostras selecionadas foram diluídas com Nitreto de Boro (BN) e suas proporções determinadas de acordo com o coeficiente de absorção do Cr considerando os elementos que compõem a matriz do solo em maior quantidade. Para tal após a determinação dos teores dos elementos pela fluorescência de raios-X se utilizou como base o elemento silício. Para este cálculo se utilizou o programa HEPHAESTUS (Ravel & Newville, 2005).

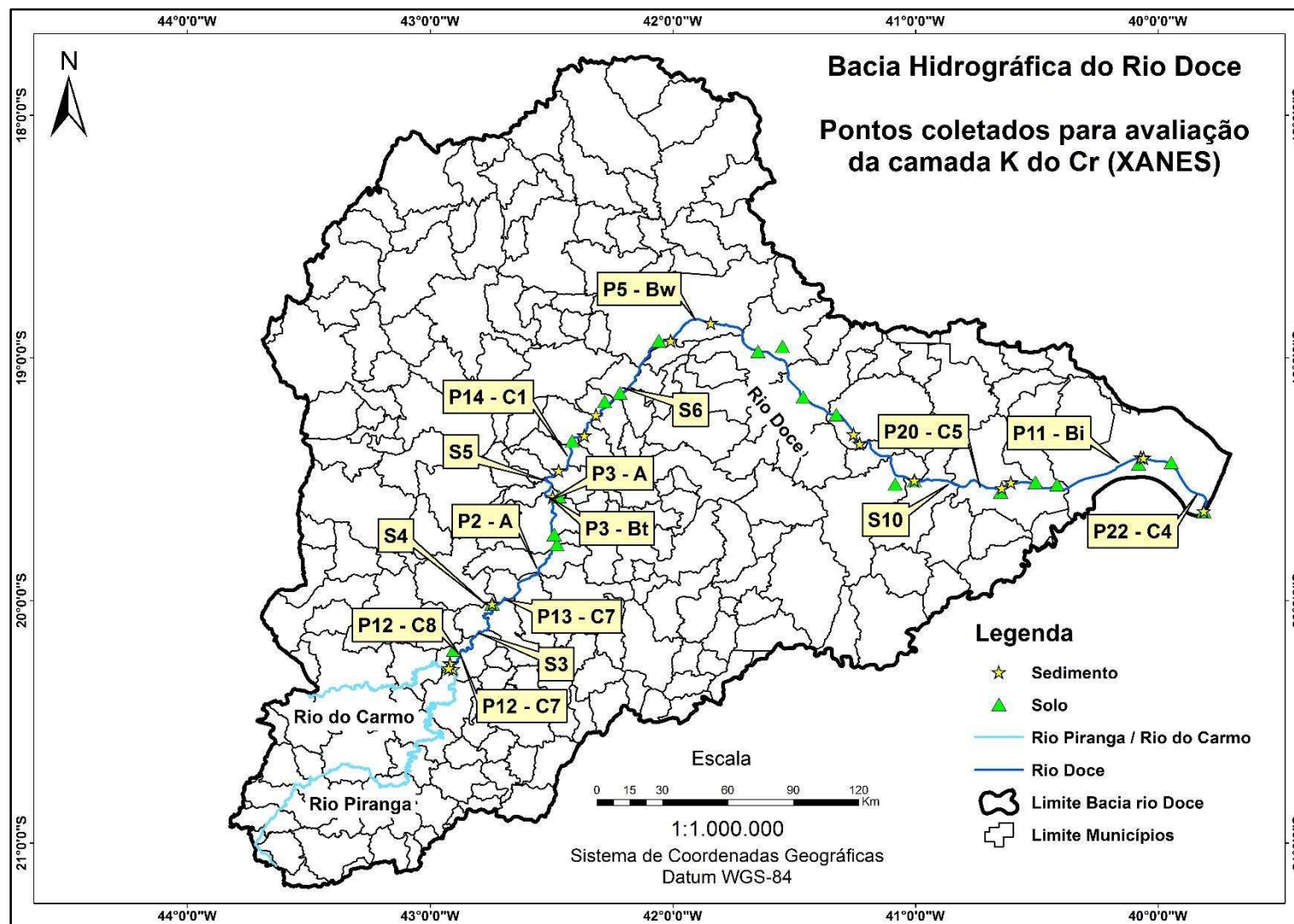


Figura 35. Mapa de distribuição das amostras coletadas para a especiação do Cr na bacia do rio Doce.

Quadro 27. Teores de Cr, Si, Al, Fe e Argila dos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos avaliados pela espectroscopia de absorção de raios-X

Hor.	Prof. (cm)	Cr	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Argila
		µg g ⁻¹	 g kg ⁻¹			
P2 - Latossolo Amarelo Distrófico típico						
A	0 - 20	152,20	458,82	329,24	69,34	630
P3 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico						
A	0 - 20	388,10	406,39	219,24	149,44	500
Bt	70 - 90	380,70	442,55	380,84	178,04	750
P5 -Latossolo Amarelo Distrófico típico						
Bw	80 - 100	163,60	546,13	284,07	57,01	600
P11 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico						
Bi	80 - 100	108,00	419,23	330,18	107,31	570
P12 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico						
C7	90 - 120	141,70	547,63	297,30	135,81	210
C8	120 - 180+	135,70	618,25	240,79	127,73	170
P13 - Neossolo Flúvico Ta Distrófico típico						
C7	109 - 133	130,70	481,07	215,84	129,90	220
P14 - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico						
C1	4 - 24	125,40	404,03	221,70	210,35	180
P20 - Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico						
C5	103 - 150	112,60	475,94	239,46	96,32	340
P22 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico						
C4	63 - 130	142,90	390,12	313,36	138,87	540
S3 – Sedimento Nascente do Rio Doce						
Margem Esquerda						
-	10 - 20	158,30	426,07	290,30	133,88	220
S4 – Sedimento Foz do Rio Casca						
Margem Direita (Antes)						
-	20 - 30	144,10	483,64	286,34	149,15	230
S5 – Sedimento Ipatinga (MG)						
Margem Esquerda (Depois)						
-	0 - 13	192,90	511,03	346,63	127,66	300
S6 – Sedimento Naque (MG) - Foz Rio Santo Antonio						
Margem Direita (Antes)						
-	0 - 12	169,50	484,28	272,35	126,35	280
S10 - Colatina (ES)						
Margem Direita (Antes)						
-	0 - 15	113,90	427,36	269,89	107,62	470

O espectro XANES da camada K do Cr foi coletado pela linha de radiação 11-2 do Laboratório de Radiação Síncrotron da Stanford University – USA. A energia incidente utilizada foi a padrão para o elemento Cr na faixa de 6000 eV. Após a coleta dos dados e refinamento pelo programa ATHENA (Ravel &

Newville, 2005) se observou que em todos os compartimentos analisados (solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos) da bacia do rio Doce, o elemento Cr se encontra em sua forma trivalente (Figura 37). Na Figura 36 se pode observar a diferença entre os espectros de sua forma trivalente e hexavalente como forma de comparação com dados de presente trabalho.

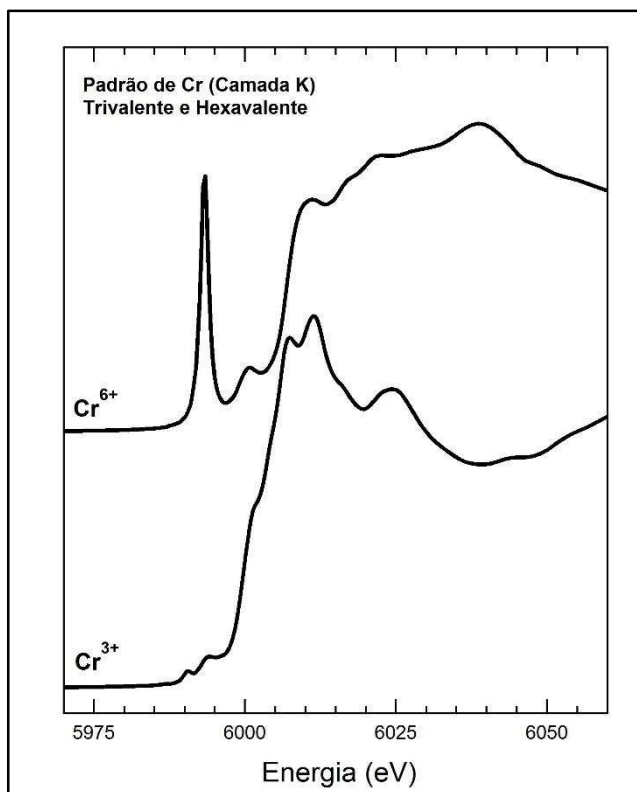


Figura 36. Espectros da camada K do Cr em sua forma trivalente e Hexavalente.

Uma vez que todos os espectros avaliados mostram a forma trivalente do Cr, pode-se afirmar que na bacia do rio Doce o perigo de intoxicação de plantas e humanos pela forma hexavalente não é uma preocupação imediata. A relação entre Cr^{3+} e Cr^{6+} é fortemente dependente do pH e das condições oxidativas, mas na maioria dos casos, o Cr^{3+} é a espécie predominante (Kotas & Stasicka, 2000).

A Figura 38 apresenta as fases de Cr presente (FeCr_2O_4 , $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$ e $\text{Cr}(\text{OH})_3$) nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos. Ao observar estes compartimentos a fase FeCr_2O_4 (cromita) se mostra presente de forma geral, com exceção do P3 – Hor. A e P5 – Hor. Bw. Assim, os teores de Cr na área possuem participação do mineral primário cromita por sua relativa resistência ao intemperismo (Gonnelli & Renella, 2013) ou mesmo sua substituição isomórfica nos óxidos de Fe e Al (Fendorf, 1995).

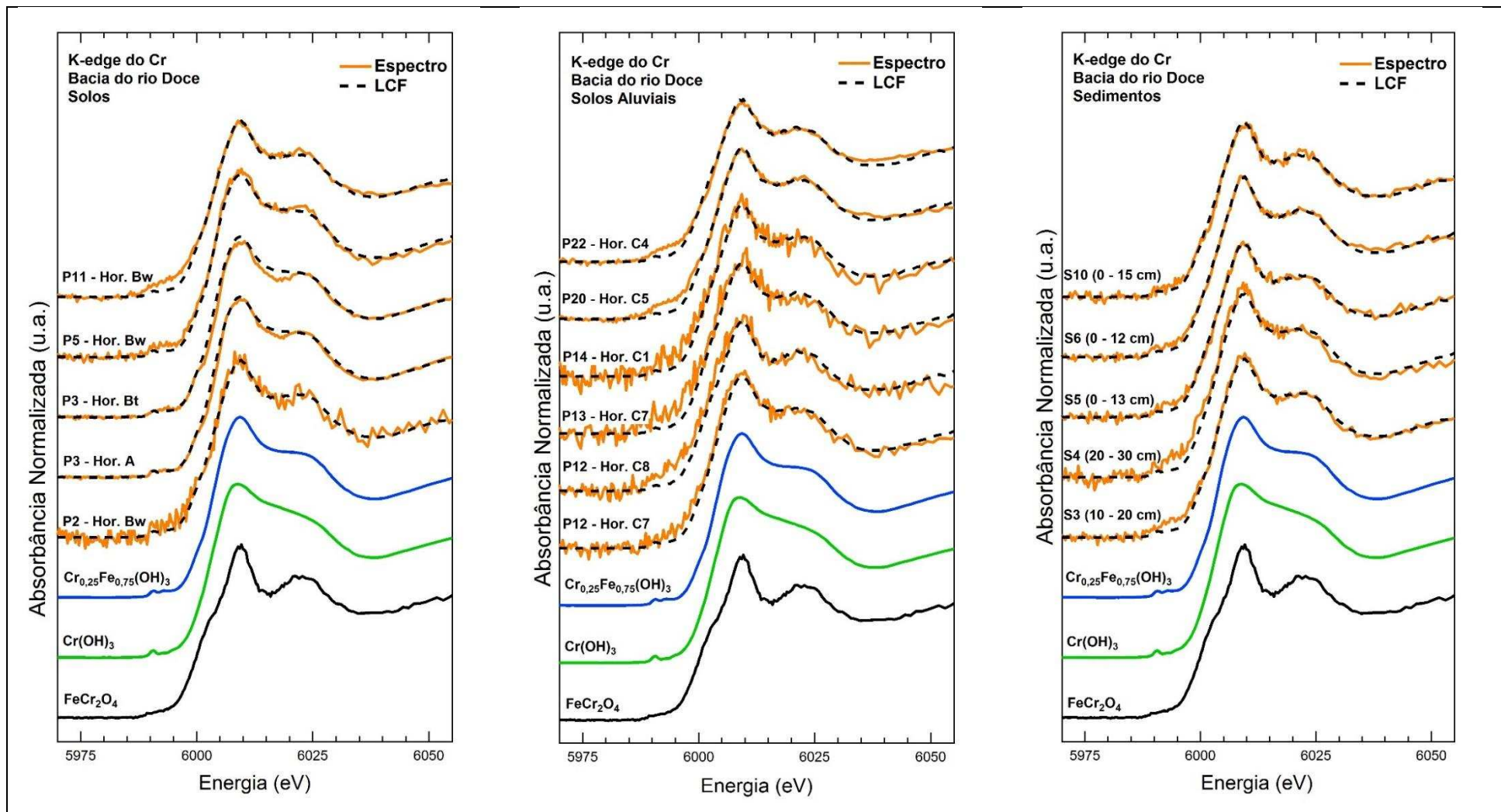


Figura 37. Expeciação do cromo pelo X-ray absorption near edge structure (XANES) em solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos da bacia do rio doce. *LCF – Linear combination fitting utilizando o programa ATHENA (Ravel & Newville, 2005).

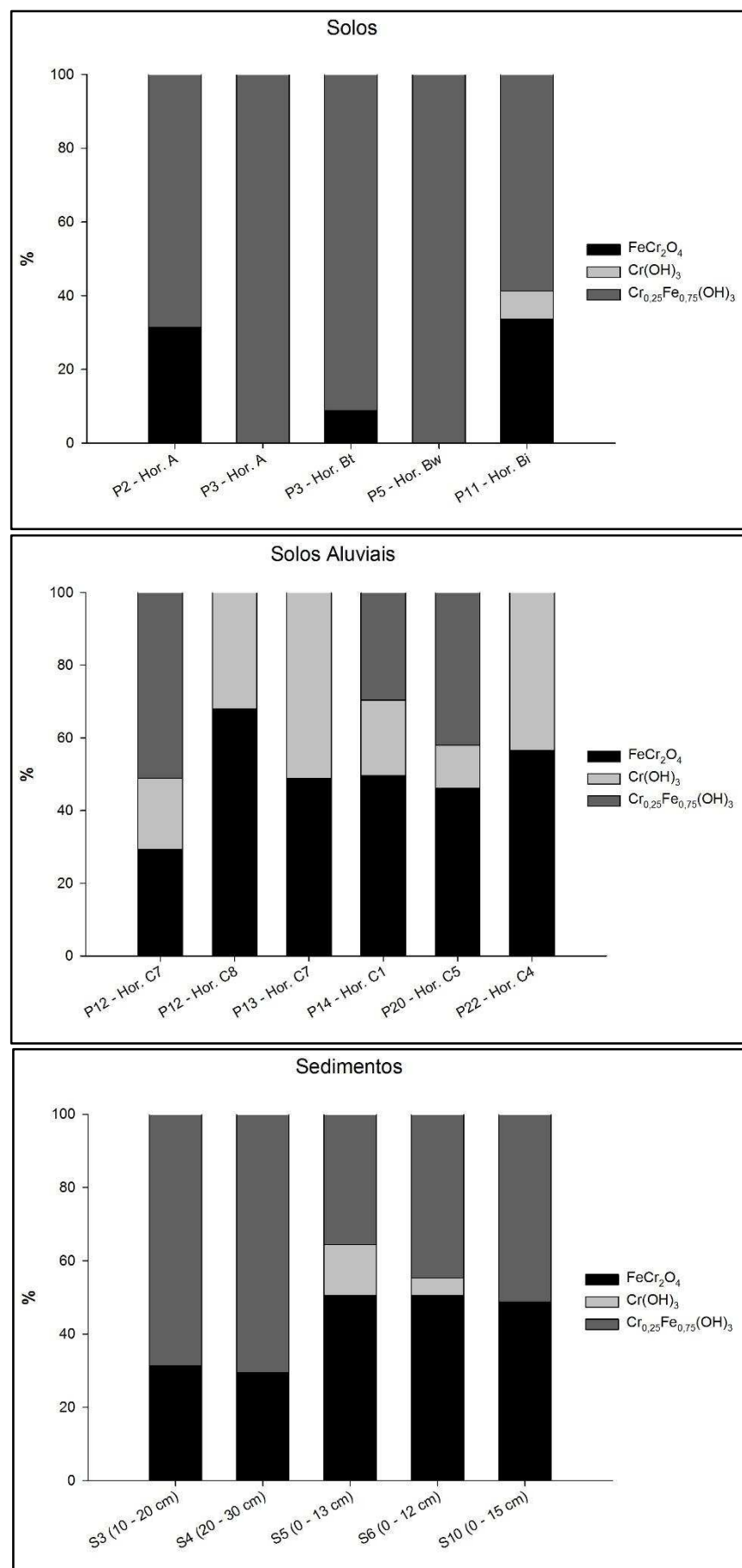


Figura 38. Especificação do Cr e suas respectivas proporções existentes nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos da bacia do rio Doce.

A fase $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$ se fez presente em todos os solos analisados (P2, P3, P5 e P11), nos Neossolos Flúvicos (P12, P14 e P20) e em todos os sedimentos (S3, S4, S5, S6 e S10). A fase $\text{Cr}(\text{OH})_3$ se observou apenas no solo P11, em todos os Neossolos Flúvicos (P12, P13, P14, P20 e P22), em apenas nos sedimentos S5 e S6 (Figura 38). As fases presentes como $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$ e $\text{Cr}(\text{OH})_3$ possuem baixa solubilidade, permitindo o sequestro efetivo do Cr em locais contaminados, sendo que a solubilidade do $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$ é muito menor do que o $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (Fendorf et al., 1994; Chartel & Manceau, 1992, Tang et al., 2010). Por isso se observa uma participação maior da fase $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$ nos solos (P2, P3, P5 e P11) pelo seu grau de pedogenese maior em comparação aos Neossolos Flúvicos e sedimentos. O $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$ e $\text{Cr}(\text{OH})_3$ também podem se formar pelo coprecipitação do Cr^{3+} e Fe^{3+} em pH neutro a alcalino ou pelo processo de adsorção na ferridrita ou outros minerais (Chartel & Manceau, 1992, Tang et al., 2010; Troiano et al., 2013). Devido à baixa solubilidade dessas fases de Cr, estas podem controlar de fato o Cr^{3+} em solos contaminados e em outros impactos ambientais tais como locais que ocorram drenagem ácida (Doelsch et al., 2006).

A presença da fase $\text{Cr}(\text{OH})_3$ indica a adsorção do Cr em sílica amorfa ou nos aluminossilicatos (Fendorf et al., 1994) fazendo com que este fato gere um mecanismo para retardar a oxidação do Cr^{3+} adsorvido a este sem potencial redox, como é o caso dos minerais silicatados presentes como a caulinita e a illita. Este processo impede a adsorção do Cr^{3+} pelos óxidos de manganês que são seu maior agente oxidante (Fendorf et al., 1994) em oposição ao Fe^{2+} , o seu agente redutor (Buerge & Hug, 1999). Assim, todo o Cr presente nos solos e sedimentos estudados na bacia do rio Doce, ou é proveniente do mineral primário cromita ou está fortemente adsorvido e/ou precipitado na forma $\text{Cr}_{0,25}\text{Fe}_{0,75}(\text{OH})_3$ e $\text{Cr}(\text{OH})_3$ dificultando seu processo de oxidação para a sua forma hexavalente.

5. CONCLUSÕES

- I. O fundo geoquímico natural determinado para os metais pesados V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba e Pb, com base nas principais classes de solos presentes ao longo do rio Doce na profundidade de 80 – 100 cm, apresentaram-se acima do valor de referência de qualidade (VRQs) para os solos de Minas Gerais (COPAM, 2011), com exceção do Cu e As;
- II. Os teores de metais pesados (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba e Pb) dos Neossolos Flúvicos e sedimentos desta bacia, apresentaram-se acima do fundo geoquímico natural na maior parte das profundidades analisadas;
- III. Os teores dos metais pesados analisados nos sedimentos do rio Doce, não indicaram incremento expressivos nos pontos avaliados, quando se compara a coleta antes e depois de cidades e afluentes deste rio. Uma vez que tamanho da partícula, descarga do rio e diluição por materiais erodidos das margens influencia no padrão de dispersão longitudinal de metais pesados em sedimentos;
- IV. Pela forma que este trabalho foi conduzido, não foi possível atribuir a responsabilidade dos teores de metais pesados apenas as atividades humanas nem qual é o principal processo de contaminação que se ocorre na bacia;
- V. A mineralogia da fração argila dos solos, solos aluvias e sedimentos da bacia do rio Doce indicaram que estes são constituídos basicamente por vermiculita, vermiculita com hidroxí-entrecamada, illita, caulinita, gibbsita,

goethita e hematita. Sendo a caulinita o principal mineral. Minerais estes de grande importância na adsorção de metais pesados;

- VI. O Cr pela *X-ray absorption near edge structure spectroscopy* (XANES), utilizando a radiação síncrotron nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos, tal elemento apresentou-se como Cr(III). Não se encontrou o Cr(VI), sua forma tóxica;
- VII. O presente estudo poderá servir como subsídio para futuras investigações geoquímicas e ambientais na região, uma vez que se estabeleceu faixas de concentração e relações de referência para vários elementos químicos presentes nos solos, Neossolos Flúvicos e sedimentos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A.N. Domínios Morfoclimáticos e Solos do Brasil. In: O Solo nos Grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o Desenvolvimento Sustentado. Editores: Victor Hugo Alvarez Venegas, Luiz Eduardo F. Fontes, Mauricio Paulo F. Fontes. – Viçosa, MG: SBCS; UFV, DPS, 1996.
- AB'SABER, A.N. o domínio dos MARES DE MORROS no Brasil. Geomorfologia 2. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo. 1966.
- AB'SABER, A.N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. Geomorfologia, São Paulo, (20): 26p. 1970.
- ABREU, M.A. Reciclagem do resíduo de cromo da indústria de curtume como pigmento cerâmico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. (Tese de Doutorado). São Paulo. 2006.
- AGBENIN, J. O., & LATIFATU, A. O. Competitive adsorption of copper and zinc by a Bt horizon of a savanna Alfisol as affected by pH and selective removal of hydrous oxides and organic matter. Geoderma, 119:85-95, 2004.
- AGBENIN, J.O.; OLOJO, L.A. 2004. Competitive adsorption of copper and zinc by a Bt horizon of a savanna Alfisol as affected by pH and selective removal of hydrous oxides and organic matter. Geoderma, 119: 85–95. 2004.
- ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils. 3ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils, In: Heavy metals in soils. B.J. ALLOWAY (ed.) Blackie, Glasgow and London, p. 29-39. 1990a.
- ALLOWAY, B.J.; JACKSON, A.P. & MORGAN, H. The accumulation of cadmium by vegetables grown on soils contaminated from a variety of sources. The Science of the Total Environment, 91: 223-236, 1990b.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo, 52:27-32, 2000.

- AMBÜHL, H.; BÜHRER, H. Zur technick der entnahme ungestorner grosse proben von sedimenten ein verbesserter bohrlot. *Schweiz z Hydrol*, v. 37, p. 175-186, 1975.
- ARIAS, H., JÚNIOR, N., MACHADO, R., BILAL, E. Geoquímica E Petrogênese Da Suíte Galiléia: Exemplo De Magmatismo Tipo-I Metaluminoso Pré-Colisional Neoproterozóico da Região d/o Médio Vale do Rio Doce (MG), 35, 23-34. 2005.
- ARKCOLL, D.B.; GOULDING, K.W.T. & HUGHES, J.C. Traces of 2:1 layer-silicate clays in Oxisols from Brazil, and their significance for potassium nutrition. *J. Soil Sci.*, 36:123-128, 1985.
- BABOROWSKI, M.; BÜTTNER, O.; MORGENSTERN, P.; JANCKE, T. & WESTRICH, B. Spatial variability of metal pollution in groyne fields of the Middle Elbe--implications for sediment monitoring. *Environ. Pollut.*, 167:115-23, 2012.
- BARTLETT, R. & KIMBLE, J. Behavior of chromium in soils: I. Trivalent forms. *J. Environ. Qual.*, 5:379-383, 1976.
- BERRÊDO, J.F., DA COSTA, M.L., VILHENA, M.P.S.P & SANTOS J.T. Mineralogia e geoquímica de sedimentos de manguezais da costa Amazônica: o exemplo do estuário do rio Marapanim (Pará). *Revista Brasileira de Geociências* 38(1): 24-35, 2008.
- BILAL, E.; HORN, A.H.; ARIAS, H.; JR, N.; CORREIA-NEVES, J.M. & MELLO, F.M. DE. Evolução magmática dos granitóides proterozóicos do setor setentrional da província estrutural. 8:77-86, 2000.
- BLEAM, W.F., Soil science applications of nuclearmagnetic-resonance spectroscopy. *Adv. Agron.* 46, 91-155. 1991.
- BREWER, P. A. & TAYLOR, M.P. The spatial distribution of heavy metal contaminated sediment across terraced floodplains. 30:229-249, 1997.
- BROWN, G.E., BARGAR, J.R., Towle, S.N., Use of X-ray absorption spectroscopy to study reaction mechanisms at oxide-water interfaces. *Abstr. Pap. Am. Chem. Soc.* 213, 36-Geoc. 1997a.
- BROWN, G.E., FOSTER, A., OSTERGREN, J., BARGAR, J.R., X-ray absorption spectroscopy and molecular environmental science. *Abstr. Pap. Am. Chem. Soc.* 214, 10-Geoc. 1997b.
- BUERGE, I.J. & HUG, S.J. Influence of Mineral Surfaces on Chromium(VI) Reduction by Iron(II). *Environ. Sci. Technol.*, 33:4285-4291, 1999.
- BURAK, D.L.; FONTES, M.P.F.; SANTOS, N.T.; MONTEIRO, L.V.S.; MARTINS, E. DE S. & BECQUER, T. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. *Geoderma*, 160:131-142, 2010.

- CAIL, T.L., HOCELLA, M.F., Experimentally derived sticking efficiencies of microparticles using atomic force microscopy. *Environ. Sci. Technol.* 39, 1011–1017. 2005.
- CAIRES, S.M. Determinação dos teores de metais pesados em solos do estado de Minas Gerais como subsídio ao estabelecimento de valores de referência de qualidade. Universidade Fedearl de Viçosa. Viçosa. (Tese de Doutorado). 2009.
- CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamento pedológico no Brasil. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência de Solo*, 12(1): 11-33, 1987.
- CAMPOS, M. L., GUIMARÃES, L. R., LOPES, R. S., ANTUNES, A. S., MELO MARQUES, J. J. G., & CURI, N. Teor e capacidade máxima de adsorção de Arsênio em Latossolos brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:1311-1318, 2007.
- CANELLAS, L.P.; ZANDONADI, D.B.; BUSATO, J.G.; BALDOTTO, M.A.; SIMOES, M.L.; MARTIN-NETO, L.; FACANHA, A.R.; SPACCINI, R. & PICCOLO, A. Bioactivity and chemical characteristics of humic acids from tropical soils sequence. *Soil Sci.*, 173:624-637, 2008.
- CAPPUYNS, V., & SWENNEN, R., Comparison of metal from recent and aged Fe-rich sediments. *Geoderma*, 137:242-251, 2006.
- CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia Prática. CPRM. 1984.
- CBH-DOCE – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Acesso: 10/06/2012. <http://www.riodoce.cbh.gov.br>, 2012.
- CERQUEIRA, B., COVELO, E.F., ANDRADE, M.L. & VEGA, F.A. Retention and mobility of copper and lead in soils as influenced by soil horizon properties. *Pedosphere*, 21: 603–614. 2011.
- CHAN, L. S., YEUNG, C. H., YIM, W. W. S. and Or, O. L. Correlation between magnetic susceptibility and distribution of heavy metals in contaminated sea-floor sediments of Hong Kong Harbour. *Environ. Geol.* 36: 77–86. 1998.
- CHARLET, L. & MANCEAU, A. X-Ray Absorption Spectroscopic Study of the Sorption of Cr (III) at the Oxide-Water Interface 1. Molecular mechanism of Cr(III) oxidation on Mn oxides. *J. Colloid Interface Sci.*, 148:, 1992.
- CHAUDHURI, P.; NATH, B.; BIRCH, G. Accumulation of trace metals in grey mangrove *Avicennia marina* fine nutritive roots: The role of rhizosphere processes. *Marine Pollution Bulletin*, 79, 284-292. 2014.
- CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUER, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. *Ciência Rural*, 33, 6, 2003.

- CISZEWSKI, D. & MALIK, I. The use of heavy metal concentrations and dendrochronology in the reconstruction of sediment accumulation, Mała Panew River Valley, southern Poland. 58:161–174, 2004.
- CISZEWSKI, D. Heavy metals in vertical profiles of the middle Odra River overbank sediments: evidence for pollution changes. *Water, Air, Soil Pollut.*, 81–98, 2003.
- COLONESE, J.P.; CASTILHOS, Z.C. & CESAR, R.G. Avaliação dos Teores de Mercúrio em Águas e Sedimentos Fluviais na Ecorregião Aquática Xingú-Tapajós (Amazônia Brasileira). *Anais da XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM*. 2010.
- CORNELL, R.M. & SCHWERTMANN, U. The iron oxide – structure, properties, reactions, occurrences and use. Wiley – VCH, Verlag GmbH & Co. Weinheim. 2003.
- CPRM – Serviço geológico do Brasil. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Acesso: <http://www.portalgeologia.com.br/mapa/> em 03/03/2014. 2003.
- CPRM – Serviço geológico do Brasil. Mapa geológico do estado do Espírito Santo. 2013
- CPRM - Serviço geológico do Brasil. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. Acesso: <http://www.portalgeologia.com.br/mapa/> em 02/09/2014. 2005.
- CURI, N., & FRANZMEIER, D. P. (1987). Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*. 1987.
- DAVIES, B.E. & LEWIN, J. Chronosequences in alluvial soils with special reference to historic lead pollution in Cardiganshire, Wales *Environ. Pollut.*, 1974.
- DEARING, J. A., Holocene environmental change from magnetic proxies in lake sediments. In Maher, B. A. & R. Thompson (eds), *Quaternary Climates and Magnetism*, Cambridge University Press, 231-278. 1999.
- DERING, J.A.; MAHER, B.A.; OLDFIELD, F. Geomorphological linkages between soils and sediments: the role of magnetic measurements. In: RICHARDS, K.S.; ARNETT, R.R.; ELLIS, S. (eds), *Geomorphology and Soils*, Allen and Unwin, London, pp. 245 – 266. 1985.
- DESENFANT, F., PETROVSKY, E. and ROCHETTE, P. Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals: case study from South France. *Water Air Soil Poll.* 152: 297–312. 2004.
- DOELSCH, E.; BASILE-DOELSCH, I.; ROSE, J.; MASION, A.; BORSCHNECK, D.; HAZEMANN, J. L.; SAINT MACARY, H.; BORRERO, J. Y. New combination of EXAFS spectroscopy and density fractionation for the speciation of chromium within an andosol. *Environ. Sci. Technol.* 40(24), 7602–7608. 2006.

- DOUGLAS, L.A. Vermiculities. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America. p.331-350. 1989.
- DU LAING, G.; RINKLEBE, J.; VANDECASTEELE, B.; MEERS, E. & TACK, F.M.G. Trace metal behavior in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. *Sci. Total Environ.*, 407:3972–3985, 2009.
- ELLIOTT, H. A.; LIBERATI, M. R.; HUANG, C. P. Competitive adsorption of heavy metals by soils. *J. Environ. Qual.*, 15: 214-217, 1986.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. 2º ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, Rio de Janeiro. 225p. Documento 132. 2011.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Avaliação ambiental integrada (AAI) dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Doce - Relatório Final. 2007.
- ESTEVES, F.A.; CAMARGO, A.F.M. Caracterização de sedimentos de 17 reservatórios do Estado de São Paulo com base no teor de feopigmentos, carbono orgânico e nitrogênio orgânico. *Ciência e Cultura*, v.34, n.5, p. 669-674, 1982.
- FANNING, D.S.; KERAMIDAS, V.Z. Micas. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America. p.331-378. 1989.
- FENDORF, S.E. & SPARKS, D.L. Mechanisms of chromium(III) sorption on silica. 2. Effect of reaction conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 28:290–7, 1994a.
- FENDORF, S.E. Surface reactions of chromium in soils and waters. *Geoderma*, 67:55–71, 1995.
- FENDORF, S.E.; LAMBLE, G.M.; STAPLETON, M.G.; KELLEY, M.J. & SPARKS, D.L. Mechanisms of chromium(III) sorption on silica. 1. Chromium(III) surface structure derived by extended x-ray absorption fine structure spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.*, 28:284–9, 1994b.
- FERNANDES FILHO, E. I.; et al. Levantamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras da Bacia do Rio Doce, Minas Gerais. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.
- FERNÁNDEZ-CADENA, J. C.; ANDRADE, S.; SILVA-COELLO, C. L.; IGLESIA, R. Heavy metal concentration in mangrove surface sediments from the north-west coast of South America. *Marine Pollution Bulletin*, 82, 221-226. 2014.
- FIALOVÁ, H.; MAIER, G.; PETROVSKÝ, E.; KAPIČKA, A.; BOYKO, T. & SCHOLGER, R. Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *J. Appl. Geophys.*, 59:273–283, 2006.
- FLOGEAC K., GUILLON, E., Aplincourt, M., Surface complexation of copper(II) on soil particles: EPR and XAFS studies. *Environ. Sci. Technol.* 38, 3098–3103. 2004.

- FONTES, M.P.F. Behavior of Heavy Metals in Soils: Individual and Multiple Competitive Adsorption. In: *Compet. Sorption Transp. Heavy Met. Soils Geol. Media*. [s.l.] CRC Press, 77–117. 2012.
- FONTES, M. P. F., & WEED, S. B. Iron oxides in selected brazilian Oxisols: I. mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 55(4), 1143–1149. 1991.
- FONTES, M.P.F. & GOMES, P.C. Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by the mineral matrix of tropical soils. *Applied Geochemistry*, 18:795-804, 2003.
- FONTES, M.P.F. & WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma*, 72: 37-52, 1996.
- FONTES, M.P.F. Iron Oxide-Clay Mineral Association in Brazilian Oxisols: A Magnetic Separation Study. *Clays Clay Miner.*, 40:175–179, 1992.
- FONTES, M.P.F., MATOS, A.T., COSTA, L.M., and NEVES, J.C.L. Competitive adsorption of zinc, cadmium, copper, and lead in three highly-weathered Brazilian soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31: 2939–2958. 200. 2000.
- FONTES, M.P.F., SANTOS, G.C.D. Lability and sorption of heavy metals as related to chemical, physical, and mineralogical characteristics of highly weathered soils. *J. Soils Sediments*, 10: 774–786. 2010.
- FONTES, M.P.F.; OLIVEIRA, T.S.; COSTA, L.M. & CAMPOS, A.A.G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. *Geoderma*, 96:81–99, 2000.
- FONTES; M. P. F, CAMARGO; O. A. & SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Scientia Agrícola*, 2001.
- FORBES, E. A., POSNER, A. M., QUIRK, J. P. Specific adsorption of divalent Cd, Co, Cu, Pb and Zn on goethite. *J. Soil Sci.*, 27:154-166, 1976.
- FROEHNER, S.; MACENO, M. & MARTINS, R.F. Sediments as a potential tool for assessment of sewage pollution in Barigüi River, Brazil. *Publicado Online DOI: 10.1007/s10661-009-1230-0*. 2009.
- GILLMAN, G.P. Using variable charge characteristics to understand the exchangeable cation status of oxic soils. *Aust. J. Soil Rés.*, Victoria, 22: 71-80, 1984.
- GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M. & MENDONÇA, E. S. Metodologia de extração fracionada de metais pesados em amostras de um Latossolo. *Ver. Bras. Ci. Solo*, 21: 543-551, 1997.
- GOMES, P. C., FONTES, M. P. F., DA SILVA, A. G., SÁ MENDONÇA, E., NETTO, A. R. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by brazilian soils. *Journal of América Soil Science Society*, 65: 1115-1121, 2001.

- GONÇALVES, L.E.S. Características gerais e história deformacional da suíte granítica G1, entre Governador Valadares e Ipanema, MG. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. Minas Gerais. (Dissertação de Mestrado). 2009.
- GONNELLI, C.; RENELLA, G. Chromium and Nickel. In: ALLOWAY, B.J.. Heavy Metal in Soils – Trace metals and metalloids in Soils and their bioavailability. 3ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- GREENLAND, D.J. & C.J.B. MOTT. Surfaces of soil clay particles. In: GREENLAND, D.J. & M.H.B. HAYES (eds.) The Chemistry of Soil Constituents. Wiley-Interscience, New York. 1978.
- GROSSL, P. R., & SPARKS, D. L. Evaluation of contaminant ion adsorption/desorption on goethite using pressure-jump relaxation kinetics. *Geoderma*, 67: 87-101, 1995.
- GUPPY, C. N., MENZIES, N. W., MOODY, P. W., & BLAMERY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Australian Journal of Soil Research*. 2005.
- HENDERSON, M. - Understanding our environment. Annual Report - CLCR Daresbury Laboratory, pp. 8-9. 1997-1998.
- HIND, A.R., BHARGAVA, S.K., McKINNON, A., At the solid/liquid interface: FTIR/ATR—the tool of choice. *Adv. Colloid Interface Sci.* 93, 91–114. 2001.
- HSU, P.H. Aluminium oxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America. p.99-138. 1989.
- HU, X.F., YU, S., RONG, Y., LI, X.Q., ZHANG, G.L., Magnetic Properties of the Urban Soils in Shanghai and Their Environmental Implications, *Catena* 70, 428–436. 2007.
- HUGHES, J.C.; BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolins and its relation to parent rock, climate and soil nature. *J. Soil Sci.*, v.30, p.557-563. 1979.
- INCAPER – Instituto capixaba de pesquisa, assistência técnica e extensão rural – <http://www.incaper.es.gov.br/?a=servicos/publicacoes> - Acesso em 20/03/2013 - 2012.
- INDA JUNIOR, A. V., & KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 29(1), 851–866. 2005.
- JOHNSTON, C.T., WANG, S.-L., Applications of vibrational spectroscopy in soil and environmental sciences. In: Chalmers, J.M., Griffiths, P.R. (Eds.), *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, vol. 4. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, UK, pp. 3192–3205. 2002.
- JORDÃO, C.P.; PEREIRA, J.L.; GOUVEA, L.C.; PEREIRA, J.C. & BRUNE, W. Contaminação de sedimentos fluviais por metais pesados nas proximidades

- de uma indústria metalúrgica em Minas Gerais. *Geochimica Brasiliensis*, 4 (1): 9-15, 1990.
- KABATA-PENDIAS, A., & MUKHERJEE, A. B.. Trace elements from soil to humans. Berlin: Springer.2007
- KAHWAGE, M. A., & MENDES, J. C. A influência da alcalinidade na causa e melhoramento de cor de berilo da província pegmatítica oriental, em Minas Gerais. *Geochimica Brasiliensis*, 19(1), 1–7. 2005
- KAMPF, N. & CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambiente pedogênicos e geoquímicos. In: Tópicos em ciência do solo, Eds: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. v. 1. SBCS. 2000.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos cauliníticos do Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Ciência do Solo*, 7:27–31, 1983.
- KARIMI, R.; AYOUBI, S.; JALALIAN, A.; SHEIKH-HOSSEINI, A.R. & AFYUNI, M. Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran. *J. Appl. Geophys.*, 74:1–7, 2011.
- Kelly, S.D., Hesterberg, D., Ravel, B., 2008. Analysis of soils and minerals using X-ray absorption spectroscopy. In: Ulery, A.L., Drees, L.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 5: Mineralogical Methods*, vol. 5. Soil Sci. Soc. Am., Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- KER, J. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Revista Geonomos*, 5(1), 17–40. 1997
- KHARE N., MARTIN, J.D. & HESTERBERG D. L. Phosphate bonding configuration on ferrihydrite based on molecular orbital calculations and XANES fingerprinting. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71: 4405-4415. 2007.
- KINNIBURG, D.G.; JACKSON, M.L., & SYERS, J.K. Adsorption of alkaline earth transition, and heavy metal cations by hydrous oxide gels of iron and aluminum. *Soil Science Society American Journal*, Madison, 40: 796-799, 1976.
- KLAMT, E., SOMBROEK, W. G. Contribution of organic matter to exchange properties of oxisols. In: *INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION - Workshop, 8.*, Rio de Janeiro, Graphos. Proceedings. Rio de Janeiro. 64-70, 1988.
- KOTAS', J., & STASICKA, Z. Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. *Environmental Pollution*, 107(3), 263–283. 2000.
- KUKIER, U., ISHAK, Ch.F., SUMMER, M.E., MILLER, W.P., Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions. *Environ. Poll.* 123, 255–266. 2003.

- KUO, S.; JELLUM, E. J.; & BAKER, A. S. Effects of soil type, liming and sludge application on zinc and cadmium availability to Swiss chard. *Soil Science*, 139: 122-130, 1985.
- LANA C.E & CASTRO P.T.A. Análise sedimentológica e de proveniência de sedimentos fluviais nas cabeceiras do rio das Velhas, município de Ouro Preto, MG. *Revista Escola de Minas*, 61(1): 2008.
- LEENAERS, H.; SCHOUTEN, C.J. & RANG, M.C. Variability of the metal content of flood deposits. *Environ. Geol. Water Sci.*, 11:95–106, 1988.
- LEMES, M.J.L., FIGUEIREDO FILHO, P.M. & PIRES M.A.F. Influência da mineralogia dos sedimentos das bacias hidrográficas dos rios Mogiguaçu e Pardo na composição química das águas de abastecimento público. *Química Nova*, Vol. 26, No. 1, 13-20, 2003.
- LIETARD, O. Contribution à l' étude des propriétés physicochimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins. Thèse Doc. Sci. Phys., Nancy, France, 345 pp. 1977.
- LIMA, E.A.R.; LIMA, W.N.; SIQUEIRA, G.W. & SIQUEIRA, N.V.M. Influência da mineralogia na composição química de metais pesados nos sedimentos pelíticos superficiais da plataforma continental do Amazonas. *Geochimica Brasiliensis*, 19(2): 103-117, 2005.
- LOPEZ-HERNANDEZ, D., SIEGERT, G., RODRIGUEZ, J.V. Competitive adsorption of phosphate with malate on oxalate by tropical soils. *Soils Society of America Journal*. 50, 1460-1462, 1996.
- LU, S.G. & BAI, S.Q. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China. *J. Appl. Geophys.*, 60:1–12, 2006.
- MADEJÓN, P. Barium in: ALLOWAY, B. J. *Heavy Metals in Soils*. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 22. 2013.
- MAIA P.D., GUIMARÃES E., MOREIRA R.C.A. & BOAVENTURA, G.R. Estudo mineralógico dos sedimentos de fundo do lago Paranoá, Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências* 35 (4): 535-541, 2005.
- MANCEAU, A.; MARCUS, M. A. & GRANGEON, S. Determination of Mn valence states in mixed-valent manganates by XANES spectroscopy. *Am. Mineral.*, 97:816–827, 2012.
- MARQUES, F. A., RIBEIRO, M. R., BITTAR, S. M. B., FILHO, A. N. T., & LIMA, J. F. W. F. Caracterização e classificação de neossolos da Ilha de Fernando de Noronha (PE). *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 31(4), 1553–1562. 2007.
- MARTINEZ-LLADÓ, X.; VILÀ, M.; MARTÍ, V.; ROVIRA, M.; DOMÈNECH, J.A. & PABLO, J. Trace element distribution in topsoils in Catalonia: background and reference values and relationship with regional geology. *Environ. Eng. Sci.*, 25/26:863-878, 2008.

- MATOS, A. T., FONTES, M. P. F., JORDÃO, C. P., & DA COSTA, L. M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 20, 379-386, 1996.
- MATOS, A. T., FONTES, M. P. F., JORDÃO, C.P., COSTA, L.M. & MARTINEZ, M.A. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution*, 111: 429- 435, 2001.
- MATOS, A.T., FONTES, M.P.F., COSTA, L.M., and MARTINEZ, M.A. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environ. Pollut.* 111: 429–435. 2001.
- MATSCHULLAT, J., BORBA, R.P., DESCHAMPS, E., FIGUEIREDO, B.F., GABRIO, T., SCHWENK, M. Human and environmental contamination in the Iron Quadrangle, Brazil. *Applied Geochemistry*, 15, 181-190, 2000.
- MATSCHULLAT, J., OTTENSTEIN, R., & REIMANN, C. Geochemical background - Can we calculate it? *Environmental Geology*, 39(July), 990–1000. 2000.
- McBRIDE, M.B. *Environmental chemistry of soils*. Oxford University press. New York. 1994.
- McCAMMON, C.A., Mossbauer spectroscopy: applications. In: Beran, A., Libowitzky, E. (Eds.), *Spectroscopic Methods in Mineralogy*, vol. 6. Eur. Mineral. Soc., Vienna, Austria, pp. 369–398. 2004.
- McKEAGUE, J. A., DAY, J. H. Dithionite and Oxalate - Extractable Fe and Al as Aids in Differentiating Various Classes of Soils. *Canadian Journal Soil Science*, v.46, p.13-22. 1965.
- McKEAGUE, J.A. & CLINE, M.G. Silica in soil solution: I. The form and concentrations of dissolved silica in aqueous extracts of some soils. *Can. J. Soil Sci.*, 43(1):70–82, 1963.
- McKENZIE, R.M. The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. *Australian J. Soil Res.*, 18: 61–73. 1980.
- MEHRA, O. P. & JACKSON, M. L. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. 7 th Natl. Conf. on Clays and Clay Minerals. p. 317-327. 1960.
- MELO V. F., NOVAIS R. F., SCHAEFER, C. E. G. R., FONTES M. P. F. & SINGH B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo Barreiras no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:29-41, 2002b.
- MELO, J.W.V de & PEREZ, D.V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: *Química e mineralogia dos solos. V.1 Conceitos Básicos*, Editores: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F. – Viçosa, MG: SBCS, 2009.

- MELO, V.F.; CORRÊA, G.F.; MASCHIO, P.A.; RIBEIRO, A.N. & LIMA, V.C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:807-819, 2003.
- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & FONTES, M.P.F. Potassium and magnesium in clay minerals of some Brazilian soil as indicated by a sequential extraction procedure. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 33:2203-2225, 2002.
- MESQUITA FILHO, M. V., & TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). *Geoderma*, 58, 107–123. doi:10.1016/0016-7061(93)90088-3. 1993.
- MEURER, E. J. Fundamentos de Química do Solo. 2. ed. Porto Alegre: Gênese. 290 p. 2004.
- MORAES, L.J. Recursos minerais do vale do rio Doce. *Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro, 15, 87, 89-90, 1950.
- MORAIS, R.M.O.; MELLO, C.L.; COSTA, F.O. & SANTOS, P.F. Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos sepósitos da Formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro. *Geol. USP. Série Cient.*, 6:19–30, 2006.
- MOREIRA, C.S., CASAGRANDE, J.C., ALLEONI, L.R.F., DE CAMARGO, O.A., and BERTON, R.S. Nickel adsorption in two Oxisols and an Alfisol as affected by pH, nature of the electrolyte, and ionic strength of soil solution. *J. Soils Sediments*, 8: 442–451. 2008.
- MORGAN, J. J., & STUMM, W., Chemical processes in the environment, relevance of chemical speciation. In: Merien, E.(Ed.), *Metals and Their Compounds in the Environment*. 1991.
- MORTON-BERMEA, O.; HERNANDEZ, E.; MARTINEZ-PICHARDO, E.; SOLER-ARECHALDE, A. M.; SANTA-CRUZ, R.L.; GONZALEZ-HERNANDEZ, G.; BERAMENDI-OROSCO, L. & URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma*, 151:121–125, 2009.
- MUDROCK, A.; MACKNIGHT, S.D. Introduction. In: MUDROCK, A.; MACKNIGHT, S.D. (eds.). *Handbook of techniques for aquatic sediments sampling*. Boca Raton, EUA: Lewis Publishers, 1-3 pp. 1994.
- MUGGLER, C. C., VAN LOEF, J. J., BUURMAN, P., & VAN DOESBURG, J. D. J. Mineralogical and (sub) microscopic aspects of iron oxides in polygenetic Oxisols from Minas Gerais, Brazil. *Geoderma*, 100, 147–171. 2001.
- NAIDU, R., KOOKANA, R. S., SUMNER, M. E., HARTER, R. D., TILLER, K. G. Cadmium sorption and transport in variable charge soils: a review. *J. Environ. Qual.*, 26:602-617, 1997.
- NAIDU, R., SUMNER, M. E., HARTER, R. D. Sorption of heavy metals in strongly weathered soils: an overview. *Environ. Geochem. Health*, 20:5-9, 1998.

- NASCIMENTO, C. W. A., FONTES, R. L. F. Correlação entre características de Latossolos e parâmetros de equações de cobre e zinco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 965-971, 2004.
- NETTO, C.; ARAUJO, M.C.; PINTO, C.P.; DRUMOND, J.B.V. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Cadastramento de recursos minerais – Pegmatitos. Vol. I. CPRM. 2000.
- NOLTING R.F., RAMKEMA A., EVERAARTS J.M. The geochemistry of Cu, Cd, Zn, and Pb in sediment cores from the continental slope of the Banc d'Arguin (Mauritania). *Continental Shelf Research*, 19, 665-691. 1999.
- NOVAIS, R.F., SMITH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 399p. 1999.
- NUNES, W. A. G. A., KER, J. C., SCHAEFER, C. E. G. R., FILHO, E. I. F., & GOMES, F. H. Relação Solo-Paisagem-Material De Origem E Gênese De Alguns Solos No Domínio Do “Mar De Morros”, Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 25 (3)(3), 341–354. 2001.
- O'Day, P.A., Brown, G.E., Parks, G.A., 1994. X-ray absorption spectroscopy of cobalt (II) multinuclear surface complexes and surface precipitates on kaolinite. *J. Colloid Interface Sci.* 165, 269–289.
- OLIVEIRA, A.A.K. Estruturação e alteração metassomática do ortognaisse açucena (suíte borrachudo) na região de Ipatinga, Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. (Dissertação de Mestrado). 2002.
- OLIVEIRA, M.J.R. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Conselheiro Pena / São Gabriel da Palha. CPRM. 2000.
- PACHECO, A.A. Pedogênese e distribuição espacial dos solos da bacia hidrográfica do rio Alegre – ES. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG. (Tese de Mestrado). 2011.
- PAL, D.K.; SRIVASTAVA, P.; DURGE, S.L. & BHATTACHARYYA, T. Role of weathering of finegrained micas in potassium management of Indian soils. *Appl. Clay Sci.*, 20:39-52, 2001.
- PARD. Projeto Águas do Rio Doce. Acesso: 18/06/2012, http://www.aguasdoriadoce.com.br/inst_bacia.asp (2012).
- PAYE, H. de S., MELLO, J. W. V. de, ABRAHÃO, W. A. P., FERNANDES Filho, E. I., DIAS, L. C. P., CASTRO, M. L. O.; FRANÇA, M. M. . Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 34(6), 2041–2051. 2010.
- PEACOCK, C.L. & SHERMAN, D.M. Copper(II) sorption onto goethite, hematite and lepidocrocite: A surface complexation model based on ab initio molecular geometries and EXAFS spectroscopy. *Geoch. et Cosm. Acta.*, 68: 2623-2637. 2004.

- PEREIRA, M. G., & ANJOS, L. H. C. Formas Extraíveis De Ferro Em Solos Do Estado Do Rio De Janeiro (1). *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 23(1), 371–382. 1999.
- PETROVSKY, E., KAPICKA, A., JORDANOVA, N. and BORUVKA, L. Magnetic properties of alluvial soils contaminated with lead, zinc and cadmium. *J. Appl. Geophys.* 48: 127–136. 2001.
- PIERANGELI, M. A. P., GUIMARÃES GUILHERME, L. R., CURI, N., COSTA, E. T. S., LIMA, J. M., MELO MARQUES, J. J. G., & FIGUEIREDO, L. F. P. Comportamento sortivo, individual e competitivo, de metais pesados em Latossolos com mineralogia contrastante. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:819-826, 2007.
- PINTO, A.L.; OLIVEIRA, G.H. & PEREIRA, G.A. A influência do aporte de sedimentos fluviais na qualidade das águas superficiais da bacia do córrego Bom Jardim, Brasilândia/MS. *Anais II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade*, Taubaté, Brasil, 09- 11 dezembro 2009, IPABHi, p. 189-198. 2009.
- PIRH-DOCE. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da bacia do Rio Doce. 2010.
- POLETO, C. Fontes potenciais e qualidade dos sedimentos fluviais em suspensão em ambiente urbano. Tese de Doutorado. UFRGS. 137p. 2007.
- RADAMBRASIL - Projeto Radambrasil, escala 1:1.000.000, folhas Rio Doce SE-24. 1984.
- RADAMBRASIL. Folhas SE 24 Rio Doce. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 548 p. 6 mapas (Levantamento de Recursos Naturais. 34). 1987.
- RAIJ, B. V. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. *Bragantia*, 28, 8, Campinas, 85–112. 1969.
- RAVEL, B.; NEWVILLE, M. ATHENA, ARTEMIS, HEPHAESTUS: data analysis for X-ray absorption spectroscopy using IFEFFIT, *Journal of Synchrotron Radiation* 12, 537–541. 2005.
- REIMANN, C. & DE CARITAT, P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: Regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Sci. Total Environ.*, 337:91–107, 2005.
- RESENDE, M.; ALLAN, J. & COEY, J.M.D. The magnetic soils of Brazil. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 78:322–326, 1986.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 5.ed. Viçosa, NEPUT, 322p. 2007.

- REZAEI, K.; SAION, E.A.; YAP, C.K.; ABDI, M.R. & RIYAH BAKHTIARI, A. Vertical Distribution of Heavy Metals and Enrichment in the South China Sea Sediment Cores. *Int. J. Environ. Res.*, 4:877–886, 2010.
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVARES, V.H. (Eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa, MG: UFV, p.289-302.1999.
- RYSEN, R.; LEERMARKERS, M., BAEYENS, W. The mobilization potential of trace metals in aquatic sediments as a tool from sediment quality classification. *Environmental Science & Policy*, 2, 75-86.1999.
- SALOMONS, W.; GROOT, A.J. pollution history of trace metals in sediments, as affected by the Rhine river. IN KRUMBEIN, W.E., Ed., *Environmental Geochemistry: Ann Arbor Sci. Publ.*, 1, 149-162. 1978.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 6ª ed. revisada e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 100 p. 2013.
- SANTOS, P. DE F.; MELLO, C.L.; MORAIS, R.M.O. DE & RIBEIRO, C. DA S. Estudo de depósitos da formação barreiras com base em reflexão por ondas de radar. *Geol. USP. Série Cient.*, 6:31–42, 2006.
- SAWNHEY, B.J. Interstratification in layer silicates In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America. p.331-378. 1989.
- SAYERS, D.E.; STERN, E.A.; LYTLE, F.W. New technique for investigation non-crystalline structures: Fourier analysis of the extended x-ray absorption fine structure. *Phys. Rev. Lett.* 27:1204-1207. 1971.
- SCHMIDT, A.; YARNOLD, R.; HILL, M. & ASHMORE, M. Magnetic susceptibility as proxy for heavy metal pollution: A site study. *J. Geochemical Explor.*, 85:109–117, 2005.
- SCHULZE, D.G., BERTSCH, P.M., *Synchrotron X-ray techniques in soil, plant, and environmental research*. *Adv. Agron.* 55, 1–66. 1995.
- SCHULZ-ZUNKEL, C. & KRUEGER, F. Trace metal dynamics in floodplain soils of the river Elbe: a review. *J. Environ. Qual.*, 38:1349–1362, 2008.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. *Minerals in soil environment*. 2. ed. Madison, Soil Sci. Soc. Am., p. 379-438. 1989.
- SCHWERTMANN, U., & CARLSON, L. Aluminum influence on iron oxides: XVII. Unit-cell parameters and aluminum substitution of natural goethites. *Soil Science Society of America Journal*. 1994.
- SHU, J., DEARING, J. A., MORSE, A. P., YU, L. Z. and YUAN, N. Determining the sources of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic and geochemical properties. *Atmospheric Environ.* 35: 2 615–2 625. 2001.

- SHUMAN, L. M. Adsorption of Zn by Fe and Al hydrous oxides as influenced by aging and pH. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 41: 703-706. 1977.
- SHUMAN, L. M. Fractionation method for soil microelements. *Soil Sci.*, 140: 11-22, 1985.
- SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 412 p. 2013.
- SILVA, M. R.; GONÇALVES JR., A. C.; PINHEIRO, A.; BENVENUTTI, J.; SUSIN, J. Distribuição de nutrientes em sedimentos fluviais do rio Itajaí- Açú, Blumenau, SC, Brasil. *Ambi-Agua*, 5 (1): 102-113, 2010.
- SLAVEK, J. & PICKERING, W.F. Metal ion interaction with the hydrous oxides of aluminum. *Water, Air, and Soil Pollution*, 39: 201-216, 1988.
- SOARES, M. R. Coeficiente de distribuição (Kd) de metais pesados e sua relação com atributos físico-químicos de solos do estado de São Paulo. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2004. 202p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz. 2004.
- SOMMER, M., KACZOREK, D., KUZYAKOV, Y., & BREUER, J. (2006). Silicon pools and fluxes in soils and landscapes - A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169, 310–329. doi:10.1002/jpln.200521981. 2006.
- SPARK, K. M., WELLS, J. D., & JOHNSON, B. B. Characterizing trace metal adsorption on kaolinite. *Eur. J. Soil Sci.*, 46:633-640, 1995.
- SPARKS, D.L., Toxic metals in the environment: the role of surfaces. *Elements* 1, 193–197. 2005.
- SPOSITO, G. Surface reactions in natural aqueous colloidal systems. *Chimia*, 43:169-176, 1989.
- SPOSITO, G. The surface chemistry of soils. New York: Oxford University Press, 234 p. 1984.
- STEVENSON, F. J., & COLE, M. A. Micronutrients and toxic metals. In: STEVENSON, F. J., COLE, M. A. *Cycles of soil*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, p. 371 – 414. 1999.
- STUMM, W. Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems. John Wiley & Sons, 428p. 1992.
- SUELI, A. & RODRIGUES, D.L. Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais. 62:155–165, 2009.
- SUGUIO, K., Introdução a sedimentologia. São Paulo. Ed. Edgard Blucher. EDUSP, 317p. 1973.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. Ambientes Fluviais. Ed, Udesc. 2. Ed. 1990.

- SWIFT, R.S., and McLAREN, R.G. Micronutrient adsorption by soil and soil colloids. In BOLT, G.H., DE BOODT, M.F., HAYES, M.H.B., and McBRIDE, M.B. (eds.), *Interactions at the soil colloid-soil solution interface*, 257–292. Part 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.1991.
- TACK, F. M. G., van RANST, E., LIEVENS, C., & VANDENBERGHE, R. E. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn. *Geoderma*, 137, 83-89, 2006.
- TAN, K. H., & TROTH, P. S. Silica-sesquioxide ratios as aids in characterization of some temperate region and tropical soil clays. *Soil Science Society of America Journal*. 1982.
- TANG, Y.; MICHEL, F.M.; ZHANG, L.; HARRINGTON, R.; PARISE, J.B. & REEDER, R.J. Structural Properties of the Cr (III) - Fe (III) (Oxy) hydroxide Compositional Series : Insights for a Nanomaterial “ Solid Solution ”. 3589–3598, 2010.
- TAYLOR, M.P. The variability of heavy metals in floodplain sediments: A case study from mid Wales. 28:71–87, 1996.
- TROIANO, J.M.; JORDAN, D.S.; HULL, C.J. & GEIGER, F.M. Interaction of Cr(III) and Cr(VI) with Hematite Studied by Second Harmonic Generation. *J. Phys. Chem. C*, 117:5164–5171, 2013.
- UHLEIN, A.; RONCATO JUNIOR, J.; EGYDIO-SILVA, M.; PARIZEK-SILVA, Y.M. & ALVES, M. Geologia, petrologia e contexto geotectônico dos gnaisses e granitóides da região de Colatina, Espírito Santo. *Rev. Geonomos*, 22(1), 66-83, 2014.
- VAN RAIJ, B. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. *Bragantia*, v. 28, n. 8, março. Campinas, 85–112. 1969.
- VAN RAIJ, B. & PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. *Soil Sei. Soe. Am. Proc.*, Madison, 36: 587-593, 1972.
- VAN RAIJ, B. Determinação de cargas elétricas em solos. 32:171–183, 1973.
- VESTENA, L.R.; LUCINI, L.R. & KOBİYAMA. Monitoramento automático de concentração de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner SC. In *Workshop Regional de Geografia e Mudanças Ambientais*, Gurapuava. Ed. Unicentro, 2007. P.61-70. 2007.
- VILLALOBOS, M., PÉREZ-GALLEGOS, A., Goethite surface reactivity: A macroscopic investigation unifying proton, chromate, carbonate and lead (II) adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 326: 307-323, 2008.
- WANG, X.-S. & QIN, Y. Relationships between heavy metals and iron oxides, fulvic acids, particle size fractions in urban roadside soils. *Environ. Geol.*, 52:63–69, 2006.
- WOLFENDEN, P. & LEWIN, J. Distribution of metal pollutants in floodplain sediments. 4:309–317, 1977.

- WOLLAST, R., MCKENZIE, F. T. The global cycle of silica. In Aston, S. R. (ed.): Silicon geochemistry and biochemistry. Academic Press, San Diego, pp. 39–76. 1983.
- YEOMANS, J.C., BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.
- YONG, R. N., WARKENTIN, B. P., PHADUNGCHWIT, Y., GALVEZ, R. Buffer capacity and lead retention in some clay minerals. Water Air Soil Pollut., 53:53-67, 1990.
- ZHAO, Y.; MARRIOTT, S.; ROGERSA, J. & IWUGOB, K. A preliminary study of heavy metal distribution on the floodplain of the River Severn , UK by a single flood event. 7. 1999.

APÊNDICES

APÊNDICE A

DRX DA FRAÇÃO ARGILA DESFERRIFICADA

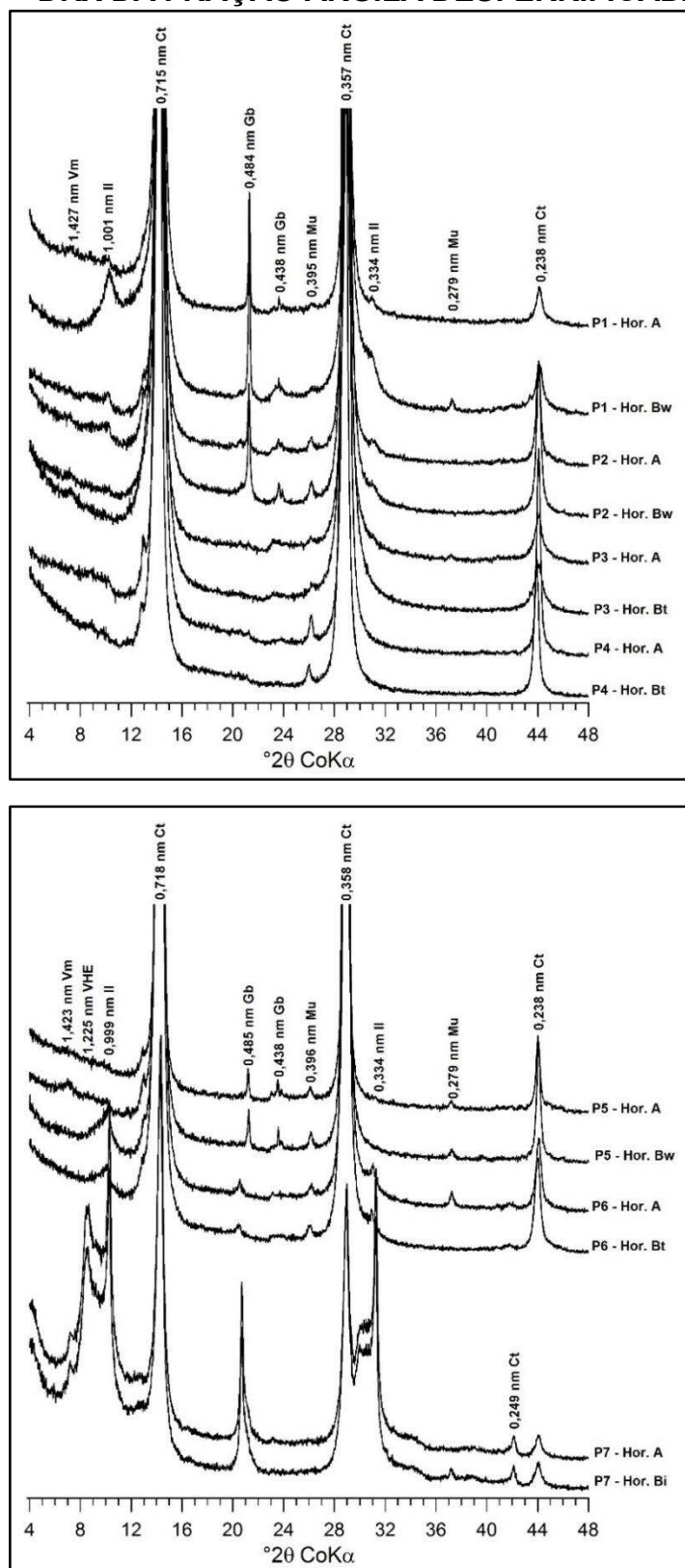


Figura 39. Difractometria de raios-X da fração argila desferrificada (amostra orientada) dos solos da parte alta da paisagem (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

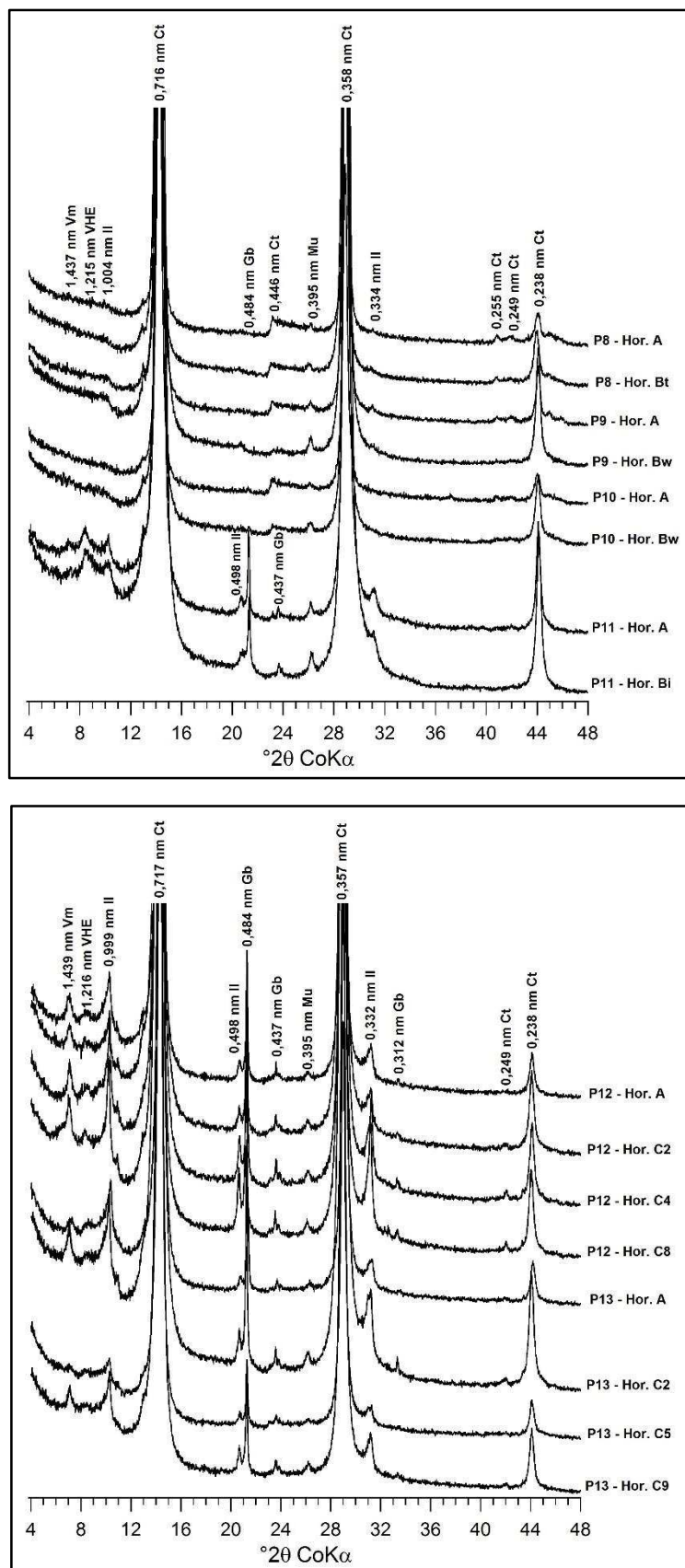


Figura 40. Difractometria de raios-X da fração argila desferificada (amostra orientada) dos solos da parte alta da paisagem (P8, P9, P10 e P11) e Neossolos Flúvicos (P12 e P13). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

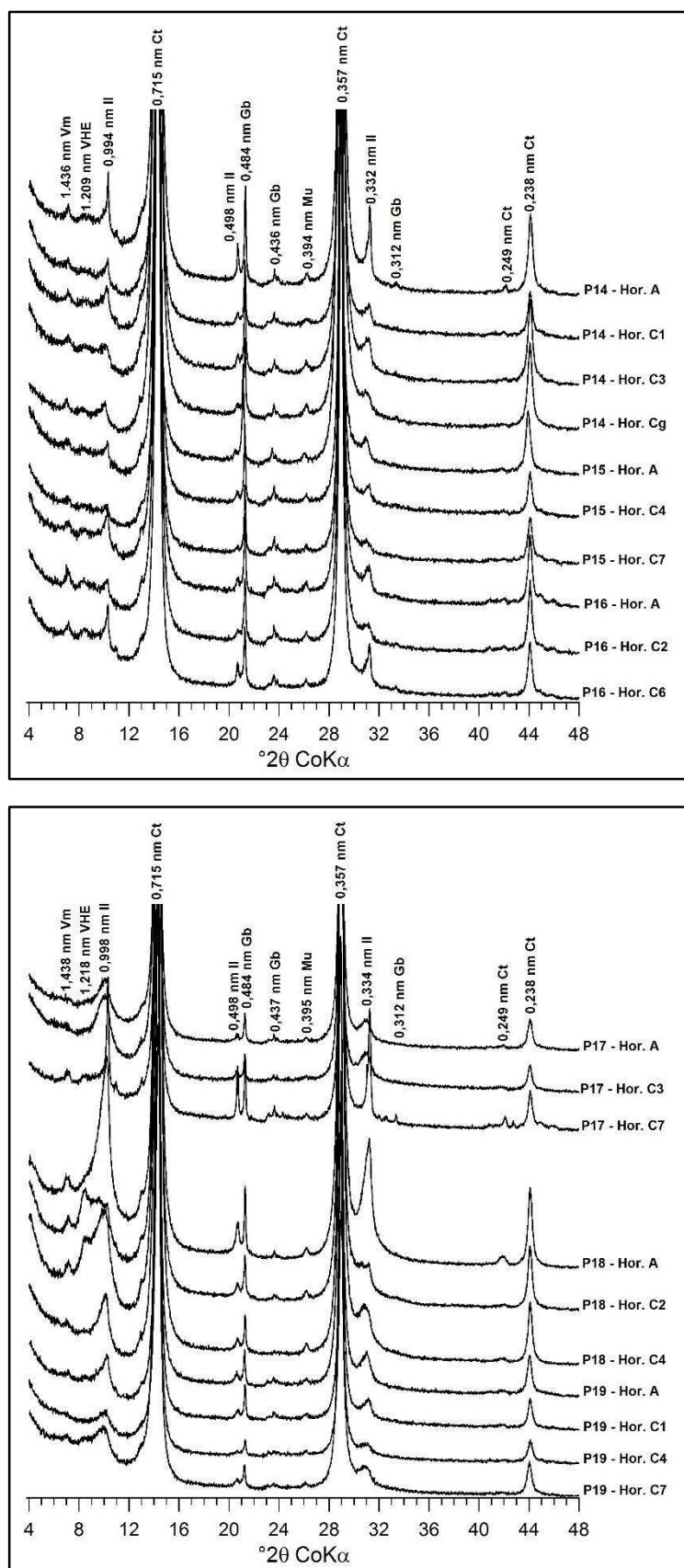


Figura 41. Difractometria de raios-X da fração argila desferrificada (amostra orientada) dos Neossolos Flúvicos (P14, P15, P16, P17, P18 e P19). Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

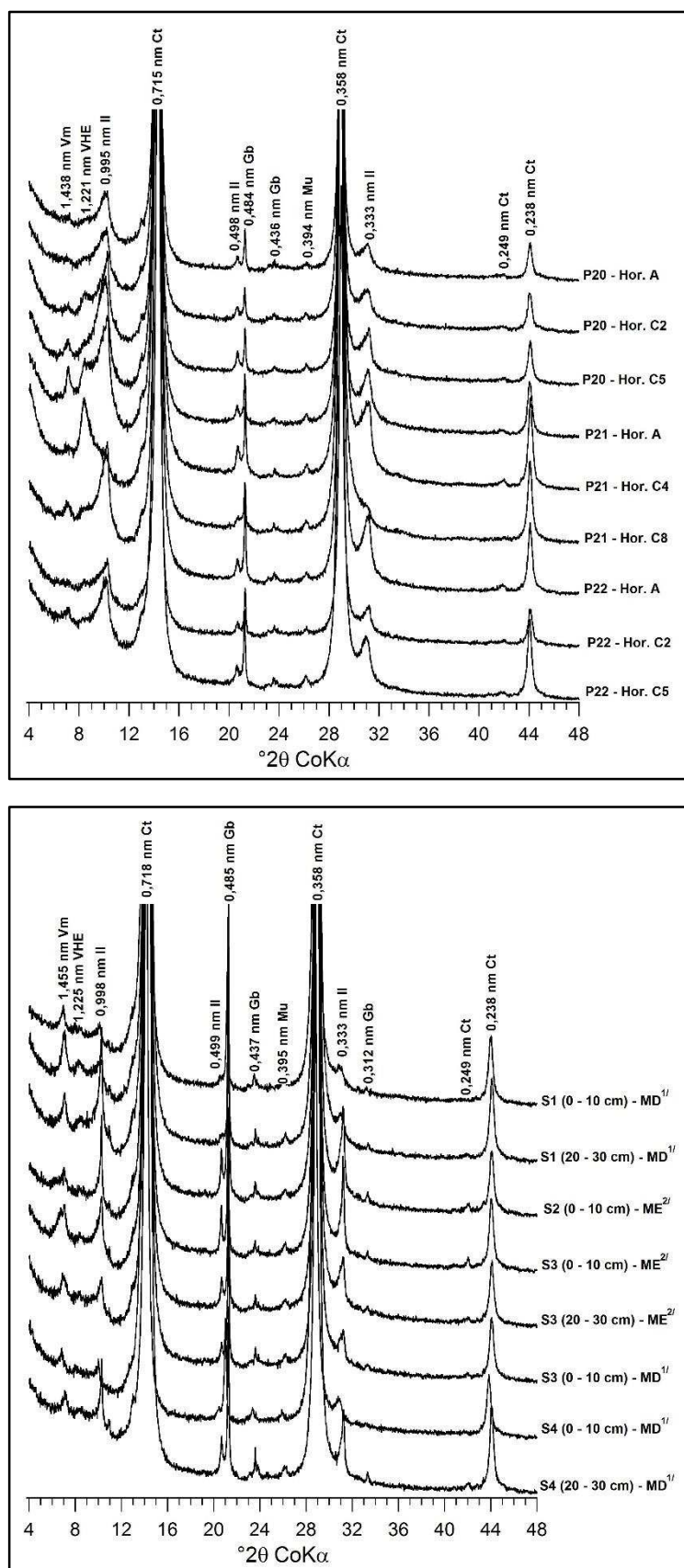


Figura 42. Difractometria de raios-X da fração argila desferrificada (amostra orientada) dos Neossolos Flúvicos (P20, P21 e P22) e sedimentos (S1, S2, S3 e S4). ¹/MD: Margem Direita; ²/ME: Margem Esquerda. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

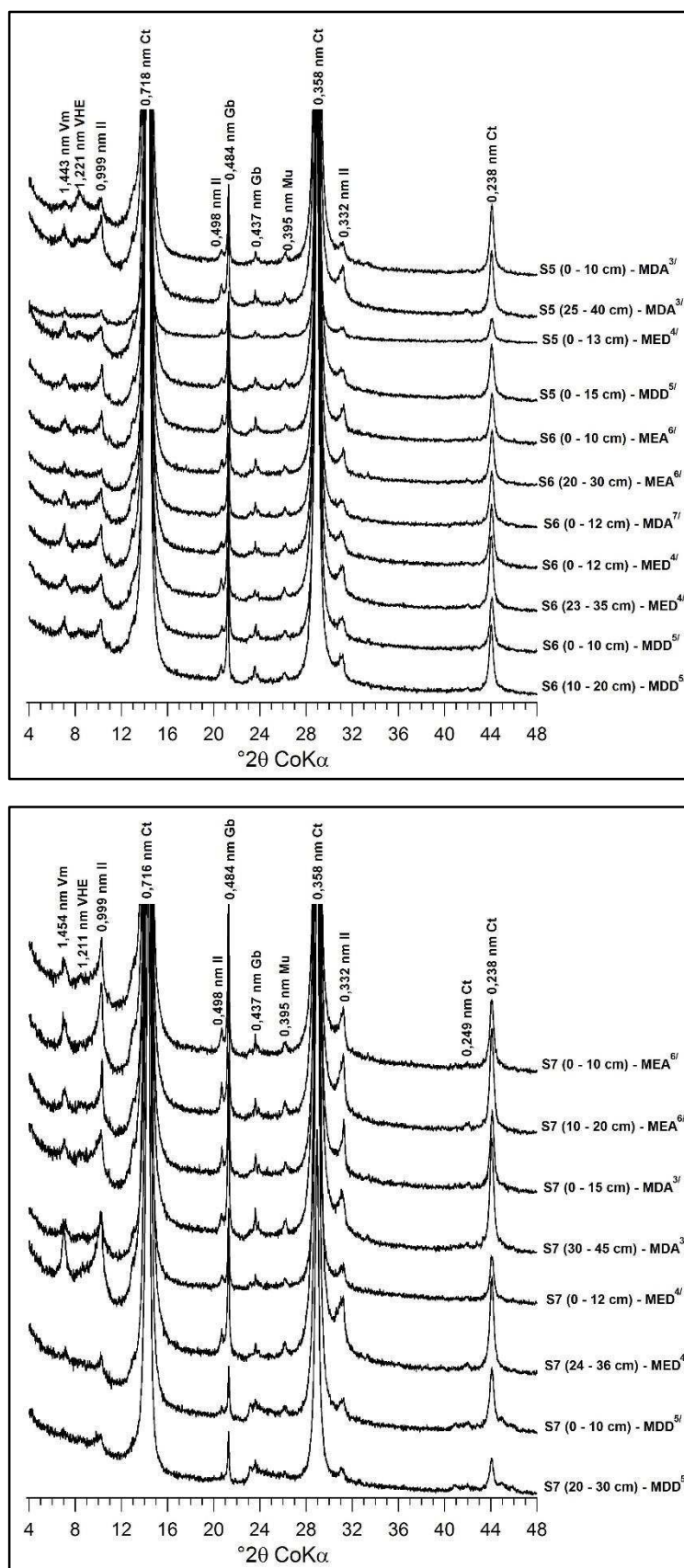


Figura 43. Difractometria de raios-X da fração argila desferrificada (amostra orientada) dos sedimentos (S5, S6 e S7). ⁶ⁱ/MEA: Margem Esquerda Antes; ³ⁱ/MDA: Margem Direita Antes; ⁴ⁱ/MED: Margem Esquerda Depois; ⁵ⁱ/MDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com Al-hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

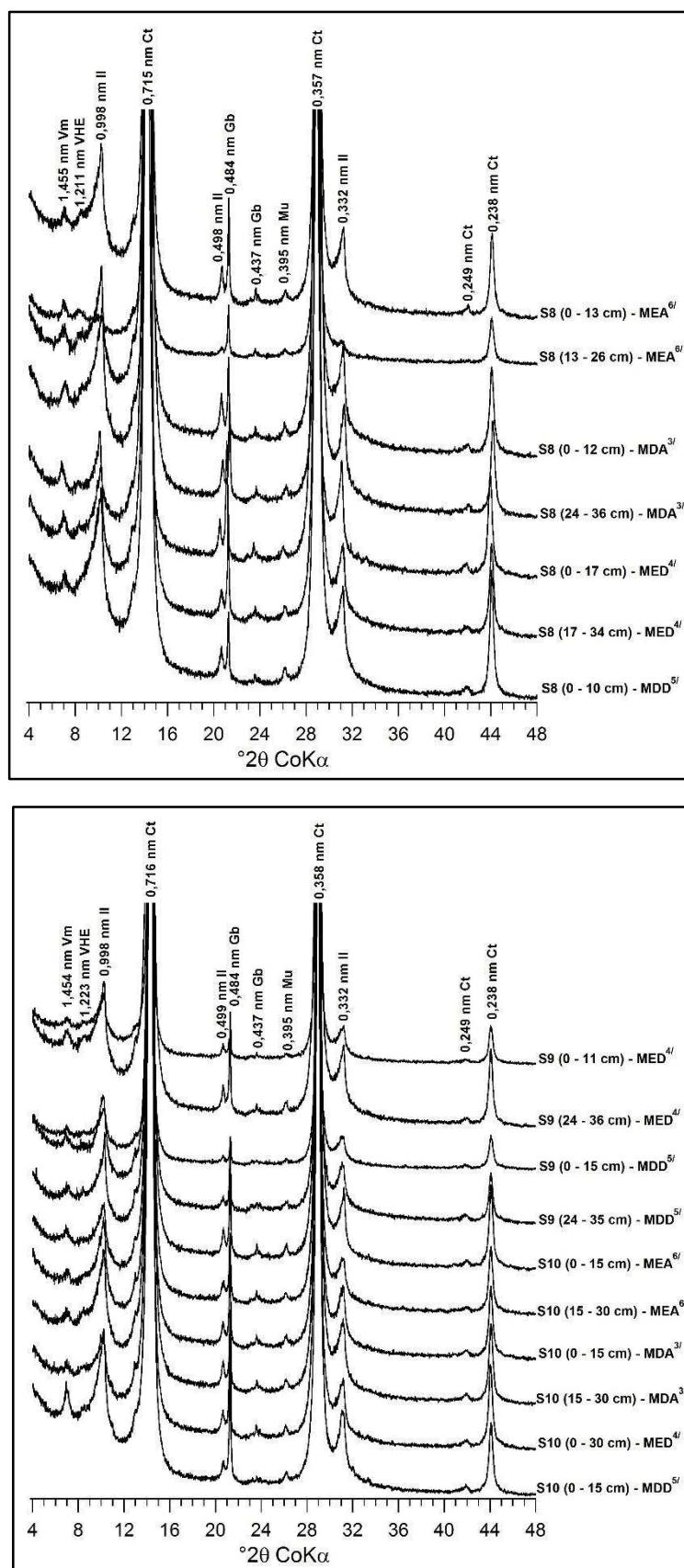


Figura 44. Difratometria de raios-X da fração argila desferrificada (amostra orientada) dos sedimentos (S8, S9 e S10). ^{6j}MEA: Margem Esquerda Antes; ^{3j}MDA: Margem Direita Antes; ^{4j}MED: Margem Esquerda Depois; ^{5j}MDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – ilita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

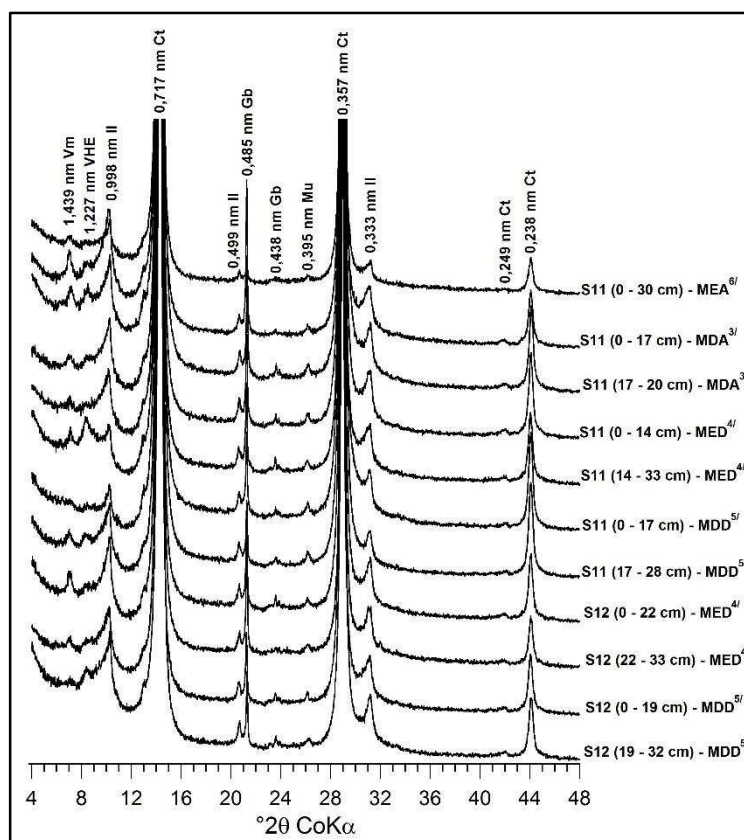


Figura 45. Difractometria de raios-X da fração argila desferrificada (amostra orientada) dos sedimentos (S11 e S12). ^{6/7}MEA: Margem Esquerda Antes; ^{3/7}MDA: Margem Direita Antes; ^{4/7}MED: Margem Esquerda Depois; ^{5/7}MDD: Margem Direita Depois. Vm – vermiculita; VHE – vermiculita com hidróxi entrecamada; Ct – caulinita; Il – illita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

APÊNDICE B

DRX DA CONCENTRAÇÃO DE ÓXIDOS

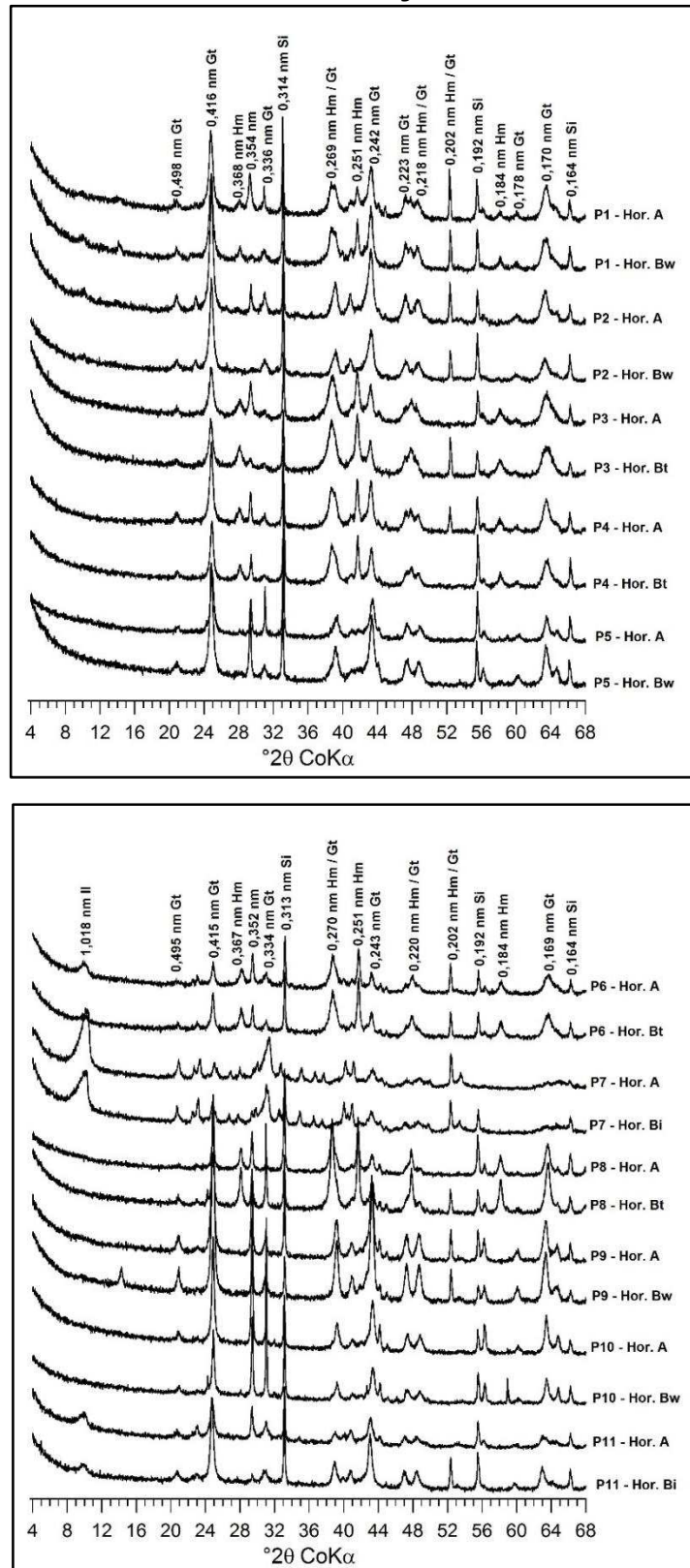


Figura 46. Difratometria de raios-X da concentração dos óxidos de ferro (amostra escavada) dos solos da parte alta da paisagem (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10 e P11). Gt – Goethita; Hm – hematita.

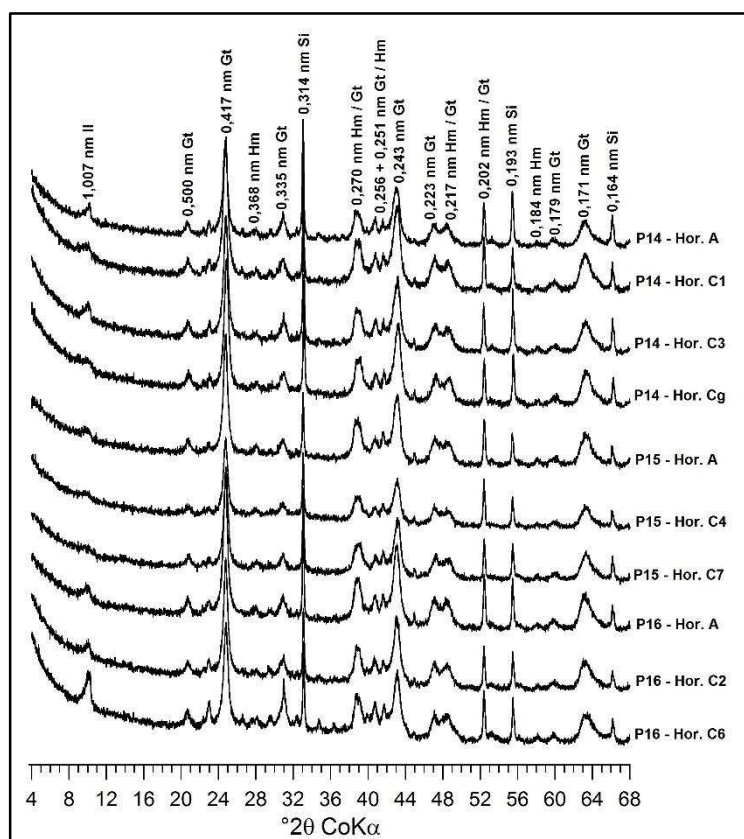
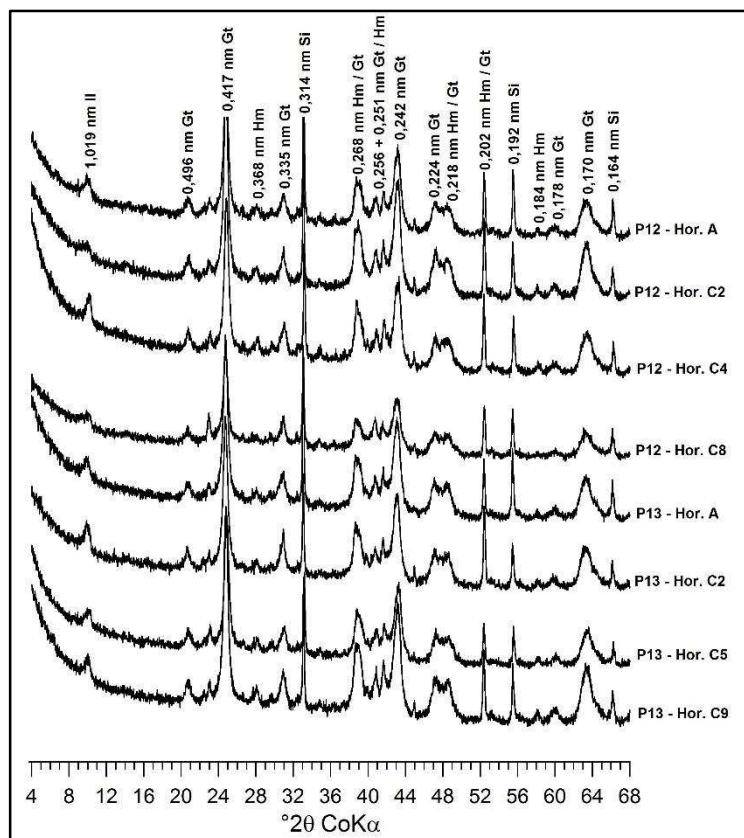


Figura 47. Difratometria de raios-X da concentração dos óxidos de ferro (amostra escavada) dos Neossolos Flúvicos (P12, P13, P14, P15 e P16). Gt – Goethita; Hm – hematita; II – ilita.

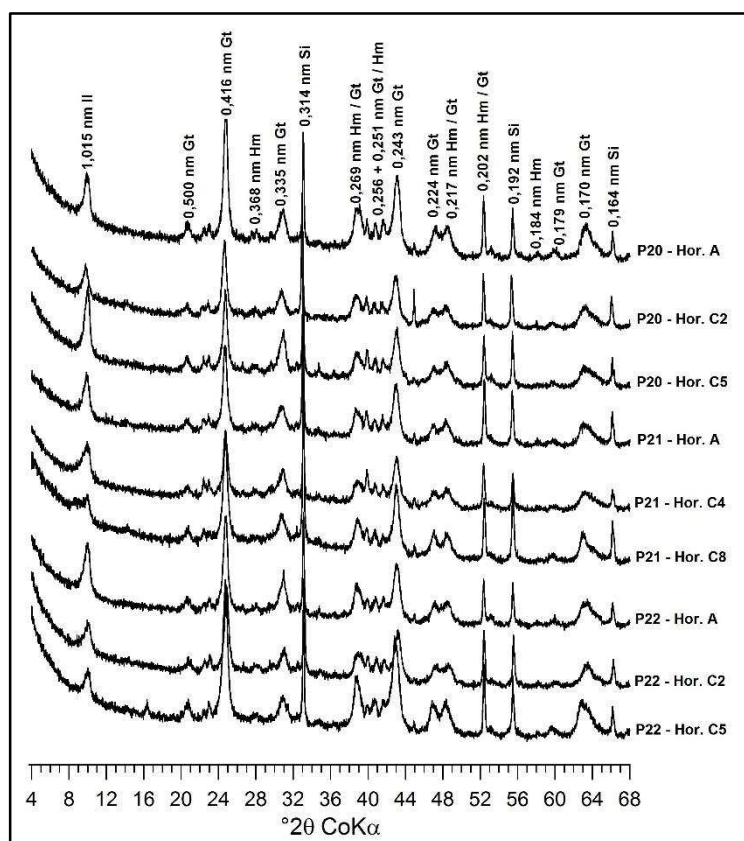
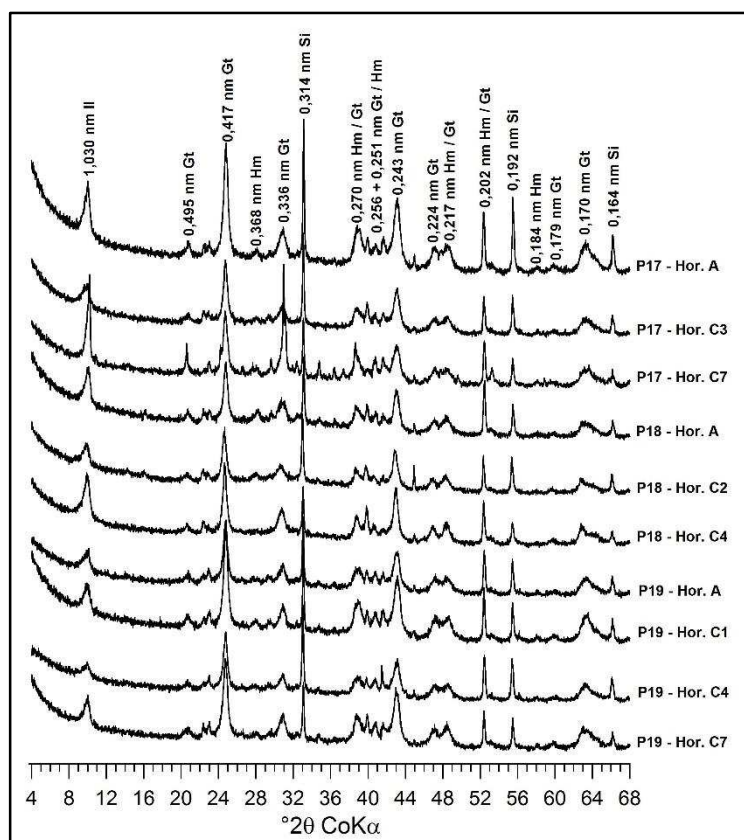


Figura 48. Difratometria de raios-X da concentração dos óxidos de ferro (amostra escavada) dos Neossolos Flúvicos (P17, P18, P19, P20, P21 e P22). Gt – Goethita; Hm – hematita; Il – ilita.

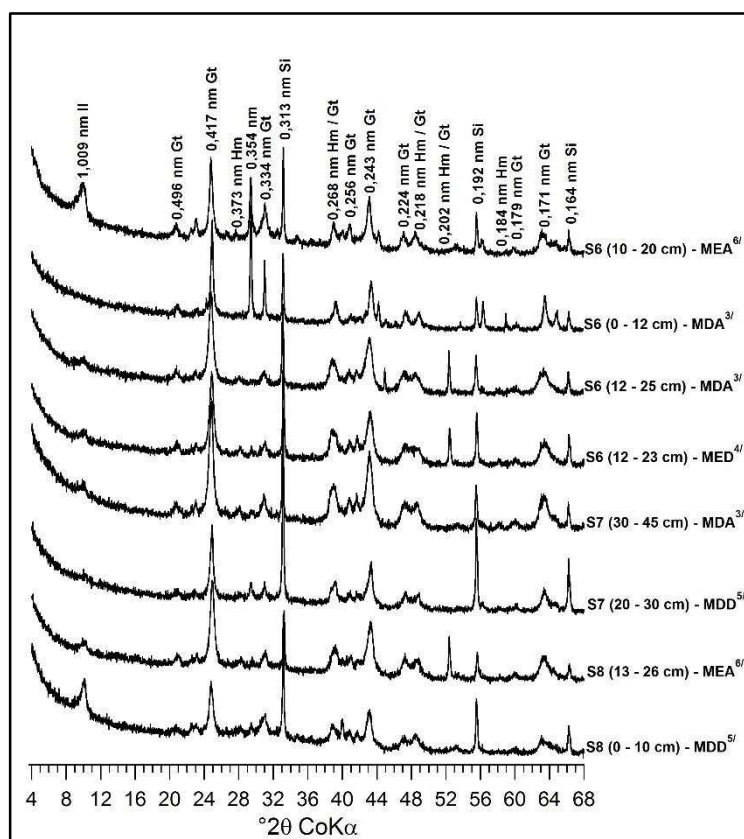
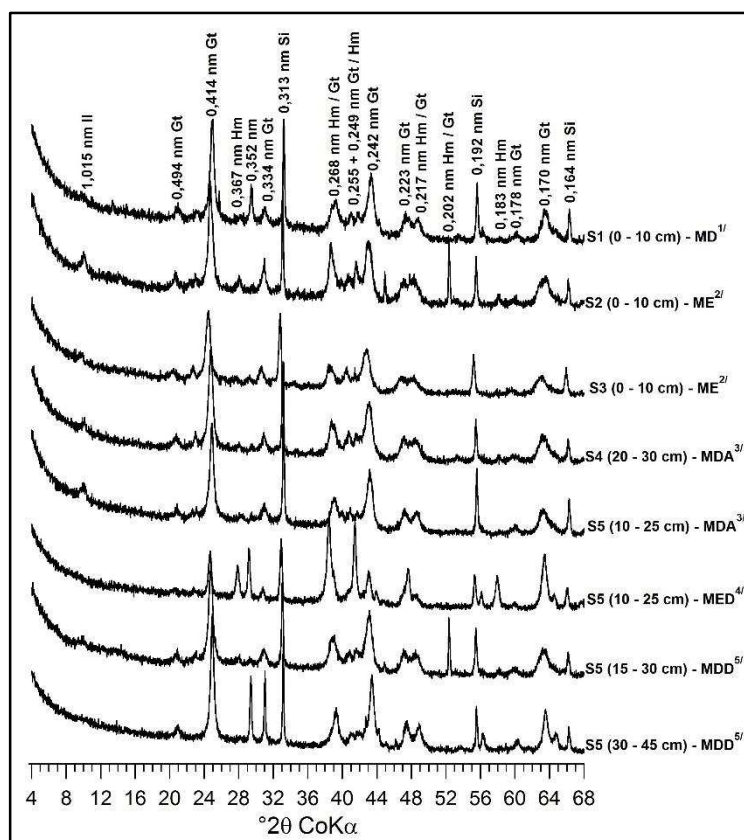


Figura 49. Difratometria de raios-X da concentração dos óxidos de ferro (amostra escavada) dos sedimentos (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 e S8). ^{1/}MD: Margem Direita; ^{2/}ME: Margem Esquerda; ^{6/}MEA: Margem Esquerda Antes; ^{3/}MDA: Margem Direita Antes; ^{4/}MED: Margem Esquerda Depois; ^{5/}MDD: Margem Direita Depois. Gt – Goethita; Hm – hematita; Il – ilita.

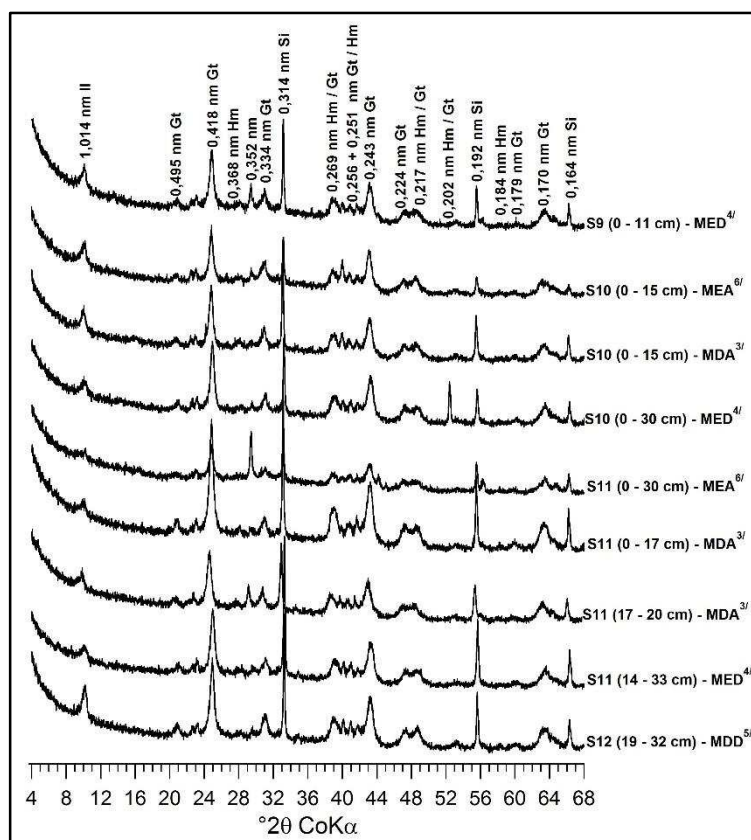


Figura 50. Difractometria de raios-X da concentração dos óxidos de ferro (amostra escavada) dos sedimentos (S9, S10, S11 e S12). ^{6/}MEA: Margem Esquerda Antes; ^{3/}MDA: Margem Direita Antes; ^{4/}MED: Margem Esquerda Depois; ^{5/}MDD: Margem Direita Depois. Gt – Goethita; Hm – hematita; Il – illita.

APÊNDICE C

Quadro 28. Taxa de recuperação dos padrões NIST avaliados pela fluorescência de Raios-X

Elemento	V. Cert. ^{1/}		V. Deter. ^{2/}		Tx. Rec. ^{3/}	V. Cert. ^{1/}		V. Deter. ^{2/}		Tx. Rec. ^{3/}
	Nist 2710					Nist 2709				
	Montana Soil					San Joaquim				
	Conc.	Erro	Conc.	Erro		Conc.	Erro	Conc.	Erro	
	 %					 %				
Al	6,440	± 0,080	7,516	± 0,027	116,71	7,500	± 0,060	9,643	± 0,030	128,57
Ca	1,250	± 0,030	1,054	± 0,002	84,28	1,890	± 0,050	1,864	± 0,002	98,60
Fe	3,380	± 0,10	3,384	± 0,004	100,13	3,500	± 0,110	3,564	± 0,004	101,83
Mg	0,853	± 0,042	1,357	± 0,0245	159,09	1,510	± 0,050	2,894	± 0,032	191,67
Mn	1,010	± 0,040	0,863	± 0,001	85,44	538,000	± 17,000	525,600	± 1,200	97,70
P	0,106	± 0,015	0,093	± 0,002	87,64	0,062	± 0,005	0,073	± 0,002	117,82
K	2,110	± 0,110	1,866	± 0,003	88,44	2,030	± 0,06	1,811	± 0,003	89,22
Si	28,970	± 0,180	31,188	± 0,040	107,65	29,660	± 0,23	31,443	± 0,04	106,01
Na	1,140	± 0,060	1,741	± 0,072	152,75	1,160	± 0,03	1,137	± 0,050	98,02
S	0,240	± 0,006	0,128	± 0,001	53,17	0,089	± 0,002	0,102	± 0,001	114,55
Ti	0,283	± 0,010	0,246	± 0,001	87,07	0,342	± 0,024	0,321	± 0,001	94,00
	 µg g ⁻¹				%	 µg g ⁻¹				%
Sb	38,400	± 3,000	26,275	± 0,400	68,42	7,900	± 0,600	4,050	± 0,200	51,27
As	626,000	± 38,000	543,800	± 4,533	86,87	17,700	± 0,800	16,050	± 0,300	90,68
Ba	707,000	± 51,000	649,575	± 2,700	91,88	968,000	± 40,000	998,000	± 2,900	103,10
Cd	21,800	± 0,200	19,350	± 0,300	88,76	0,380	± 0,010	2,425	± 0,200	638,16
Cr	39,000	*	30,825	± 0,667	79,04	130,000	± 4,000	118,650	± 0,800	91,27
Co	10,000	*	*	*	0,00	13,400	± 0,700	14,575	± 3,500	108,77
Cu	2950,000	± 130,000	2562,500	± 6,000	86,86	34,600	± 0,700	33,125	± 0,700	95,74
Pb	5532,000	± 80,000	4863,000	± 8,000	87,91	18,900	± 0,500	18,650	± 0,700	98,68
Hg	32,600	± 1,800	31,333	± 0,850	96,11	1,400	± 0,080	0,700	± 0,001	50,00
Ni	14,300	± 1,000	21,000	± 0,800	146,85	88,000	± 5,000	92,525	± 1,100	105,14
Ag	35,300	± 1,500	45,225	± 0,400	128,12	0,410	± 0,03	5,200	± 0,100	1268,29
Sr	330,000	*	276,450	± 0,767	83,77	231,000	± 2,000	205,375	± 0,500	88,91
V	76,600	± 2,300	70,775	± 2,367	92,40	112,000	± 5,000	107,900	± 2,300	96,34
Zn	6952,000	± 91,000	5790,250	± 8,000	83,29	106,000	± 3,000	97,400	± 0,800	91,89

^{1/} Valor Certificado NIST. ^{2/} Valor determinado pela Fluorescência de raios-X. ^{3/} Taxa de Recuperação