



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO

PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EVOLUÇÃO CRUSTAL
E RECURSOS NATURAIS

Geologia Ambiental e Conservação dos Recursos Naturais
Processos Superficiais: Intemperismo, Erosão, Transporte e Deposição.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero (Minas
Gerais, Brasil)**

por

Daniel Duarte de Oliveira

Orientadora: Prof^ª. Dra. Mariângela Garcia Praça Leite

Co-orientador: Prof. Dr. Avacir Casanova Andreello

Co-orientador: Dr. Teodoro Gauzzi Rodrigues de Araújo

Ouro Preto – Abril/2019

**INVENTÁRIO DE RADIONUCLÍDEOS EM SOLOS DO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MINAS GERAIS, BRASIL)**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

Prof. Dr. Sérgio Francisco de Aquino

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

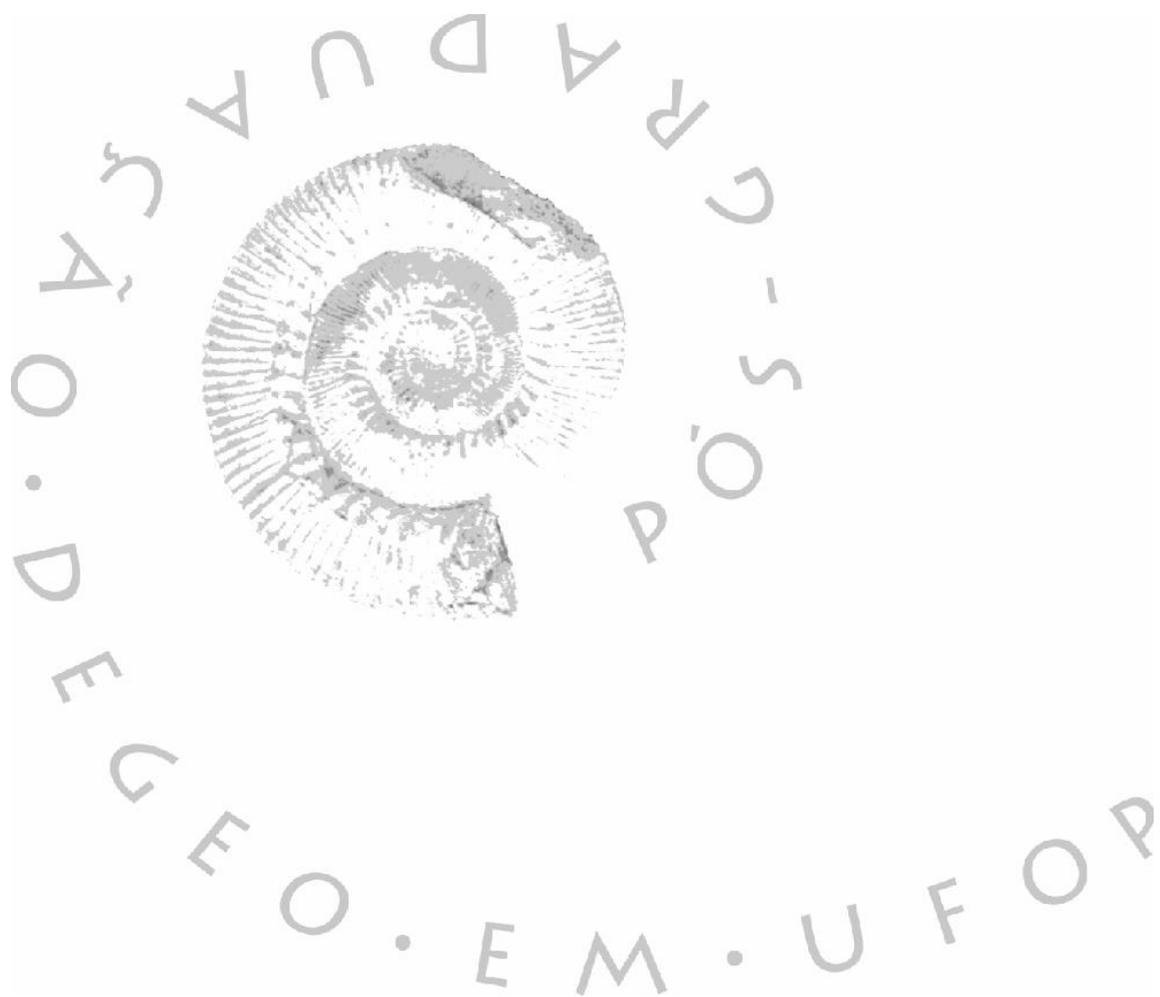
Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani de Mota Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe (Interino)

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca



EVOLUÇÃO CRUSTAL E RECURSOS NATURAIS

CONTRIBUIÇÕES ÀS CIÊNCIAS DA TERRA – VOL. 78

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 384

**Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero
Ferrífero (Minas Gerais, Brasil)**

Daniel Duarte de Oliveira

Orientadora

Profa. Dra. Mariângela Garcia Praça Leite

Co-orientador

Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello

Co-orientador

Dr. Teodoro Gauzzi Rodrigues de Araújo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como pré-requisito à obtenção do Título de Mestre em Ciências Naturais,
Área de Concentração: Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais

OURO PRETO

2019

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas – <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia – <http://www.degeo.ufop.br/>
Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais
Campus Morro do Cruzeiro s/n – Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606 e-mail: pgrad@degeo.ufop.br

Os direitos de tradução e reprodução reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

ISSN 85-230-0108-6
Depósito Legal na Biblioteca Nacional
Edição 1ª

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação – SISBIN – Universidade Federal de Ouro Preto
<http://www.sisbin.ufop.br>

O482i Oliveira, Daniel Duarte.
Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) [manuscrito] / Daniel Duarte Oliveira. - 2019.
146f.: il.: color; graf; tabs; mapas. (M)

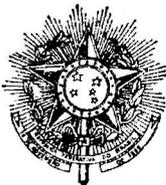
Orientadora: Profª. Drª. Mariângela Garcia Praça Leite.
Coorientador: Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais.
Área de Concentração: Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais ? GARN.

1. Geoquímica. 2. Quadrilátero Ferrífero (MG). 3. Chumbo. 4. Urânio. 5. Cambissolo. I. Leite, Mariângela Garcia Praça. II. Andrello, Avacir Casanova. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 550.4

<http://www.sisbin.ufop.br>



FICHA DE APROVAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TÍTULO: “Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero”.

AUTOR: DANIEL DUARTE DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF.^a DR.^a MARIANGELA GARCIA PRAÇA LEITE

DATA DA DEFESA: 02 de maio de 2019.

PRESIDENTE: PROF.^a DR.^a MARIANGELA GARCIA PRAÇA LEITE

BANCA EXAMINADORA:



PROF.^a DR.^a MARIANGELA GARCIA PRAÇA LEITE (PRESIDENTE - UFOP)



PROF. DR. PEDRO FONSECA DE ALMEIDA E VAL (UFOP)

(Participação por videoconferência)

PROF. DR. ALEXANDER DARIO ESQUIVEL LÓPEZ (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
DE PANAMÁ)

“Não há modo de ensinar, mais forte e suave que o exemplo: persuade sem retórica, impele sem violência, reduz sem rivalidade, convence sem debate todas as dúvidas, desata e corta caladamente todas as desculpas.”

Padre Manuel Bernardes

Dedico o trabalho aos filhos de Maria José e Orizis: Lúcia, Dikinho e Geroma, meus exemplos de persistência, simplicidade e alegria.

Agradecimentos

À orientadora, professora Dr^a Mariangela Garcia Praça Leite, pela ajuda e paciência no desenvolvimento do trabalho e pela confiança desde o início da orientação.

Ao co-orientador, professor Avacir Casanova Andrello, pela parceria, ensinamentos e por me receber tão gentilmente no Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

Ao co-orientador Dr. Teodoro Gauzzi pela amizade desde o início da caminhada e apoio na realização do trabalho.

Ao Dr. Roberto Pelacani G. Monteiro pela parceria e apoio no desenvolvimento do trabalho e à Dr^a Ângela Amaral pela realização das análises e cuidado com as amostras enviadas ao CDTN.

À professora Dr^a Alessandra Kozovits pela importante orientação no início da caminhada.

À Dr^a Isabela Claret Torres pelos ensinamentos, paciência, construções e revisões.

Ao amigo e irmão João Malta pela ajuda nos trabalhos de campo, durante o desenvolvimento da dissertação e pela parceria de sempre.

Ao Davi Jessé da Silva por disponibilizar sua oficina, seu conhecimento, e sua enorme vontade de ajudar. Obrigado pelo rico exemplo familiar durante os dias em que estive em seu convívio.

Aos amigos de Londrina, Derick Tedesco e Jamille Mansur, pela recepção e pelos momentos de descontração, e, à Laura Sartori pela ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários do ICMBio, IEF e RPPN do Caraça, pela concessão das autorizações de pesquisa e, pelo apoio à realização das atividades de campo.

Aos colegas do Degeo Willian, Estephany, Rafael pelo convívio amigável na sala 307, e à Bruna, pelo apoio na preparação das amostras.

Aos colaboradores do laboratório LGqA-UFOP, Dr^a Adriana, Dr Celso e Dr Leonardo pelos ensinamentos, pela paciência e pela confiança.

À equipe do laboratório de difração de Raios X do Degeo/UFOP pela colaboração no trabalho.

Aos servidores da UFOP, em especial à Daiana, sempre disposta a ajudar na resolução dos problemas, e, ao Marcos pela boa companhia nos períodos noturnos e nos finais de semana laboratoriais.

À minha família que torceu e que foi paciente durante meu período de afastamento.

À CAPES, pelo fornecimento de recursos imprescindíveis ao desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo Rafael Cota pela atenção e apoio na finalização da dissertação.

À minha esposa Leandra por sempre me incentivar e inspirar.

Sumário

AGRADECIMENTOS	ix
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxiii
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	25
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	25
1.1.1 – Radionuclídeos	27
1.1.1.1 – ¹³⁷ Cs.....	27
1.1.1.2 – ²¹⁰ Pb.....	29
1.1.1.3 – ²³⁸ U	31
1.2 – OBJETIVOS	32
CAPÍTULO 2: ÁREA DE ESTUDO	33
2.1 – QUADRILÁTERO FERRÍFERO (QF)	33
2.1.1 – Clima	33
2.1.2 – Geologia.....	34
2.1.3 – Gemorfologia.....	37
2.1.4 – Pedologia	38
2.2 – UNIDADES DE CONSERVAÇÃO	40
2.2.1 – Parque Estadual do Rola Moça.....	40
2.2.2 – Estação Ecológica de Fechos	42
2.2.3 – Parque Nacional da Serra do Gandarela	43
2.2.4 – Reserva Particular do Patrimônio Natural da Serra do Caraça	45
2.2.5 – Estação Ecológica de Arêdes.....	46
2.2.6 – Floresta Estadual do Uaimii.....	48
2.2.7 – Parque Estadual do Itacolomi	50
2.2.8 – Parque Estadual da Serra de Ouro Branco.....	51
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	54
3.2 – DEFINIÇÃO DA MALHA AMOSTRAL.....	55
3.3 – AMOSTRAGEM DO SOLO	56
3.3.1 – Equipamentos de Coleta	58
3.3.2 – Preparação das Amostras em Campo.....	60
3.3.3 – Classificação dos Perfis do Solo.....	60

3.4 – ANÁLISES LABORATORIAIS	61
3.4.1 – Preparação das Amostras em Laboratório.....	61
3.4.2 – Análise Granulométrica	62
3.4.3 – Análise de Carbono Orgânico Total (COT)	62
3.4.4 – Análises Químicas.....	62
3.4.5 – Difratometria de Raio-X	63
3.4.6 – Análises de Matizes	64
3.4.7 – Análise de Radionuclídeos.....	64
3.5 – CÁLCULOS DE ATIVIDADE E INVENTÁRIO.....	66
3.5.1 – Determinação da Taxa Líquida de Contagem.....	66
3.5.2 – Determinação da Concentração por Amostra (Cn)	67
3.5.3 – Determinação do Chumbo Precipitado ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)	67
3.5.4 – Determinação do Inventário de Referência (A_{ref})	67
3.6 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS	68
3.6.1 – Correlação de Pearson.....	68
3.6.2 – ANOVA e Teste de Tukey.....	68
3.6.3 – Análise Multivariada (PCA e CATPCA).....	68
CAPÍTULO 4: CAMBISSOLOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	70
4.1 – DESCRIÇÃO DOS PERFIS	70
4.1.1 – Parque Estadual Serra de Ouro Branco (OBR).....	70
4.1.2 – RPPN Santuário do Caraça (CAR)	71
4.1.3 – Parque Estadual Serra do Rola Moça (RLM)	71
4.1.4 – Parque Nacional da Serra do Gandarela – Amostra 01 (GDR-1)	72
4.1.5 – Estação Ecológica de Arêdes (ARD)	73
4.1.6 – Estação Ecológica de Fechos (FCH).....	74
4.1.7 – Floresta Estadual do Uaimii (UAI)	75
4.1.8 – Parque Estadual do Itacolomi (ITA)	76
4.1.9 – Parque Nacional da Serra do Gandarela – Amostra 02 (GDR-2)	77
4.2 – GRANULOMETRIA	78
4.3 – MINERALOGIA	81
4.4 – GEOQUÍMICA	84
4.4.1 – Carbono Orgânico Total (COT).....	84
4.4.2 – Elementos Estáveis	86
4.4.2.1 – Análise de Componentes Principais (PCA)	95
CAPÍTULO 5: ATIVIDADES, INVENTÁRIOS E DISTRIBUIÇÃO DE ^{137}Cs, ^{210}Pb E ^{238}U NOS SOLOS DO QF	98
5.1 – ^{137}Cs	98
5.2 – ^{210}Pb	106

5.3 – ^{238}U	115
5.4 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA).....	121
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES.....	124
REFERÊNCIAS	126
APÊNDICE A: CORRELAÇÕES E CONCENTRAÇÕES DOS ELEMENTOS ESTÁVEIS DETECTADOS	138

Lista de Figuras

Figura 1.1 – A cadeia de decaimento do ^{238}U resultante da emissão sucessiva de partículas- α e partículas- β de isótopos intermediários.....	27
Figura 1.2 – Modelo de decaimento do ^{137}Cs	28
Figura 1.3 – Deposição global de ^{137}Cs devido ao “ <i>fallout</i> ” radioativo.....	29
Figura 1.4 – Trajetória do ^{210}Pb atmosférico.....	30
Figura 1.5 – Distribuição de ^{210}Pb no perfil de solo.....	30
Figura 1.6 – Fluxos deposicionais atmosféricos de ^{210}Pb . (a) Distribuição no hemisfério norte, Turekian <i>et al.</i> (n=9); (b) Distribuição no hemisfério sul, Turekian <i>et al.</i> (n=5); (c) Distribuição no hemisfério norte e sul; Baskaran, 2011 (n=167), e, (d) Distribuição no hemisfério norte e sul, Persson, 2016 (n=76).....	31
Figura 2.1 – Distribuição espacial das áreas homogêneas de precipitação de Minas Gerais (Guimarães <i>et al.</i> , 2009).	34
Figura 2.2 – Mapa Geológico do QF.....	35
Figura 2.3 – Coluna estratigráfica do QF. A direita da coluna representa os relacionamentos na parte leste do QF, enquanto o lado esquerdo do gráfico representa os relacionamentos no parte ocidental do QF. Modificado de Alkmim & Marshak (1998).	36
Figura 2.4 – Relevo do QF. Legenda: A: Serra do Curral; B: Sinclinal Moeda; C: Sinclinal Gandarela; D: Chapada de Canga; E: Sinclinal Alegria; F: Sinclinal Ouro Fino; G: Sinclinal Conta Historia; H: Sinclinal Dom Bosco (Carmo, 2010).	38
Figura 2.5 – Localização das Unidades de Conservação (UC) alvo da coleta de amostras.	40
Figura 2.6 – Mapa de solos do Parque Estadual da Serra do Rola Moça – RLM	42
Figura 2.7 – Mapa de solos da Estação Ecológica de Fechos – FCH	43
Figura 2.8 – Mapa de solos do Parque Nacional da Serra do Gandarela – GDR.....	44
Figura 2.9 – Mapa de solos do Parque Nacional da Serra do Caraça – CAR	46
Figura 2.10 – Mapa de solos da Estação Ecológica de Arêdes – ARD.....	47
Figura 2.11 – Mapa de solos da Floresta Estadual do Uaimii – UAI.....	50
Figura 2.12 – Mapa de solos do Parque Estadual do Itacolomi (ITA).....	51
Figura 2.13 – Mapa de solos do Parque Estadual da Serra de Ouro Branco – OBR.....	52
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia utilizada na realização do Inventário.	54
Figura 3.2 – (a) Fotografia durante uma das coletas; (b) modelo de ponto amostral.	57
Figura 3.3 – Modelo do perfil de amostragem.	57
Figura 3.4 – (a) Prato raspador (Andrello 2004); (b) prato raspador adaptado para realização deste trabalho.....	58
Figura 3.5 – (a) Cilindro raspador (Andrello, 2004); (b). detalhes do trado de Andrello confeccionado para realização deste trabalho.	59
Figura 3.6 – a) Finalização da coleta com o prato raspador; b) amostragem em incrementos de profundidade com o trado de Andrello após a utilização do prato raspador.	59

Figura 3.7 – (a) Esquema do trado caneco utilizado; (b) material utilizado em campo, incluindo o trado caneco.	60
Figura 3.8 – (a) Peneiramento em campo; (b) conjunto de amostras identificadas após a coleta.	60
Figura 3.9 – (a) Destorroamento das amostras; b) quarteamento das amostras.	61
Figura 3.10 – a) Moinho de bolas planetário modelo PM-100-CM. LGqa/DEGEO; b) solo seco moído <0,063 mm.	62
Figura 3.11 – (a) Frascos Savillex® em chapa aquecida; (b) filtragem após digestão total.	63
Figura 3.12 – (a) Porta-amostras utilizados para espectrometria de ^{137}Cs e ^{238}U , (b) porta-amostras utilizados para espectrometria de ^{210}Pb	65
Figura 3.13 – Diagrama em blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama (Andrello, 2004).	65
Figura 3.14 – Picos de contagem demonstrados no gráfico do software <i>Gamma Acquisition & Analysis</i>	66
Figura 4.1 – Perfil do solo amostrado em OBR.	70
Figura 4.2 – Perfil do solo amostrado na RPPN Santuário do Caraça (CAR).	71
Figura 4.3 – Modelo de Perfil de solo da amostra RLM.	72
Figura 4.4 – Modelo de Perfil de solo da amostra GDR-1.	73
Figura 4.5 – Detalhe nas concreções em forma de chumbo de caça, em GDR-1.	73
Figura 4.6 – Modelo de Perfil de solo da amostra ARD.	74
Figura 4.7 – Modelo de perfil de solo da amostra FCH.	75
Figura 4.8 – Modelo de perfil de solo da amostra UAI.	76
Figura 4.9 – Modelo de Perfil de solo da amostra ITA.	77
Figura 4.10 – Modelo de Perfil de solo da amostra GDR-2.	78
Figura 4.11 – a) O detalhe indica o mosqueamento presente no horizonte Bi da amostra GDR-2, b) Saprólito com estrutura laminar retirado entre a profundidade de 50 a 60 cm da amostra GDR-2.	78
Figura 4.12 – Distribuição da granulometria dos solos coletados nas diferentes Unidades de Conservação (UC).	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.13 – (a) Gráfico biplot e (b) resultados da PCA para as variáveis de granulometria.	80
Figura 4.14 – Gráficos score plot da PCA para as variáveis de granulometria. a) com todas as unidades, b) sem as unidades ARD, GRD1 e GRD2.	80
Figura 4.15 – Composição Mineral das UC, representadas da seguinte forma OBR (O), CAR (C), FCH (F), RLM (R), ITA (I), UAI (U), ARD (A), GDR-1 (G1), GDR-2 (G2).	84
Figura 4.16 – Distribuição vertical do Carbono Orgânico Total (COT) no solo das diferentes Unidades de Conservação (UC).	85
Figura 4.17 – Distribuição vertical das concentrações de Fe e Al nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.	87
Figura 4.18 – Distribuição vertical das concentrações de Na, Ti, Si, Mn e K nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.	88
Figura 4.19 – Distribuição vertical das concentrações de Cr, S, Mg e Ca nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.	90
Figura 4.20 – Distribuição vertical das concentrações de P, Ba, V, Ni e Zr nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.	92

Figura 4.21 – Distribuição do Zn, Sr, Cu e Co nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.	93
Figura 4.22 – Distribuição do Th, As, Y e Sc nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.	95
Figura 4.23 – Resultado da Análise de Componente Principal (PCA). Propriedades do Solo (n=35). Geoquímica – As, Cu, Mo, Ni, Th, Be, Ca, Pb, S, Li, Sc, Y, Zn, Sr, Cr, V, Co, Zr, P, Mn, Si, Ba, Mg, Ti, Na, K, Fe, Al.....	96
Figura 5.1 – Distribuição vertical da atividade do ^{137}Cs nos cambissolos das UC distribuídas no QF.....	99
Figura 5.2 – (a) Inventário de ^{137}Cs em solos não perturbados do QF e representação da diferença estatística obtida pela ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$), onde as letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si; (b) Gráfico de distribuição do ^{137}Cs entre as UC.....	101
Figura 5.3 – Relação entre a atividade do ^{137}Cs , cuja atividade (Bq.kg^{-1}) é indicada pelas barras, e o Carbono Orgânico Total (COT), cuja quantidade (dag.kg^{-1}), é indicada pela linha pontilhada, ao longo dos 60 cm de profundidade.	103
Figura 5.4 – Relação entre os estoques de COT e de ^{137}Cs entre nos perfis de solo (0-60cm) das Unidades de Conservação.	104
Figura 5.5 – Relação entre os estoques de ^{137}Cs e a média granulométrica em cada Unidade de Conservação.	105
Figura 5.6 – Distribuição vertical da atividade do ^{210}Pb nos cambissolos das UC distribuídas no QF.....	107
Figura 5.7 – Gráficos mostrando a distribuição entre as UC de: (a) $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, (b) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ e (c) $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$	111
Figura 5.8 – Relação entre a atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$. O $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$, tem suas concentrações (Bq.kg^{-1}) indicadas pelas barras negras enquanto o $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tem suas concentrações indicadas pelas barras cinzas. A quantificação (dag.kg^{-1}) do Carbono Orgânico Total (COT) é dada pela linha pontilhada, ao longo dos 60 cm de profundidade.	112
Figura 5.9 – Relação entre os estoques de COT e de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ entre as Unidades de Conservação.....	113
Figura 5.10 – Relação entre os estoques de ^{210}Pb e a média granulométrica de cada Unidade de Conservação.	115
Figura 5.11 – Distribuição da Atividade do ^{238}U e incerteza analítica, em função da profundidade das amostras de solos. As variações representadas no gráfico indicam a incerteza obtida no equipamento de leitura.....	117
Figura 5.12 – (a) Inventário de ^{238}U em solos não perturbados do QF e representação da diferença estatística obtida pela ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$), onde as letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si; (b) Gráfico de distribuição do ^{238}U entre as UC.....	119
Figura 5.13 – Relação entre a atividade do ^{238}U e o Carbono Orgânico Total (CO) nas diferentes profundidades de coleta.....	120
Figura 5.14 – Resultado da Análise de Componente Principal (PCA). Propriedades do Solo (n=35). Granulometria – Areia, Silte e Argila. Geoquímica – As, Cu, Mo, Ni, Th, Be, Ca, Pb, S, Li, Sc, Y, Zn, Sr, Cr, V, Co, Zr, P, Mn, Si, Ba, Mg, Ti, Na, K, Fe, Al. Radionuclídeos ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{238}U . Carbono Orgânico Total (COT).....	121

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Teores de U em minerais de rochas ígneas	32
Tabela 2.1 – Caracterização das áreas homogêneas de precipitação em Minas Gerais	34
Tabela 3.1 – Localização das áreas amostrais	56
Tabela 4.1 – Composição mineralógica das amostras de solo	79
Tabela 4.2 – Resultados das ANOVAs para as variáveis de granulometria (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si).....	81
Tabela 4.3 – Composição mineralógica das amostras de solo	81
Tabela 4.4 – Distribuição do Carbono Orgânico Total (COT) nos perfis de solos coletados nas Unidades de Conservação, sob diferentes fitofisionomias (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si).....	85
Tabela 4.5 – Médias (mg.kg^{-1}) e resultados do teste de Tukey da ANOVA para metais pesados na presença de hidróxidos (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si)	86
Tabela 4.6 – Pesos das variáveis para componentes analisados	96
Tabela 5.1 – Média de concentração de atividade do ^{137}Cs nas Unidades de Conservação (UC) em função da profundidade amostrada (letras iguais identificam médias estatisticamente não diferentes entre si).....	100
Tabela 5.2 – Relação de inventários de ^{137}Cs no Brasil e em uma região na Argentina	102
Tabela 5.3 – Resultados das correlações e covariâncias do ^{137}Cs e a granulometria	105
Tabela 5.4 – Média das concentrações de atividade do ^{210}Pb total nas Unidades de Conservação (UC) em função da profundidade amostrada (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si).....	108
Tabela 5.5 – Relação de concentrações atividades de ^{210}Pb no Brasil e em uma região na África do Sul	109
Tabela 5.6 – Inventário de ^{210}Pb e representação da diferença estatística obtida pela ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$) (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si).....	110
Tabela 5.7 – Resultados das correlações entre COT e o ^{210}Pb	113
Tabela 5.8 – Resultados das correlações e covariâncias do ^{210}Pb e a granulometria	114
Tabela 5.9 – Médias de concentração de atividade do ^{238}U por profundidade amostrada. Não houve diferenças significantes entre as médias.....	117
Tabela 5.10 – Médias de concentração de atividade do ^{238}U por profundidade amostrada. Não houve diferenças significantes entre as médias.....	118

Resumo

Este estudo teve como objetivo inventariar as concentrações de ^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U nos horizontes superficiais de solos preservados na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), no estado de Minas Gerais. O mesmo procurou comparar distribuições horizontais e verticais destes radionuclídeos entre e ao longo dos cambissolos de oito Unidades de Conservação (UC) pertencentes a esta região: Parque Estadual do Rola Moça (RLM), Estação Ecológica de Fechos (FCH), Parque Nacional da Serra do Gandarela (GDR-1 and GDR-2), Reserva Particular do Patrimônio Natural da Serra do Caraça (CAR), Estação Ecológica de Arêdes (ARD), Floresta Estadual do Uaimií (UAI), Parque Estadual do Itacolomi (ITA) e Parque Estadual da Serra de Ouro Branco (OBR).

Os solos estudados foram amostrados em perfis de 60 cm de profundidade e foram realizadas análises granulométricas, mineralógicas (difratometria de raios X em pó – DRX), químicas (espectrofotometria de emissão ótica em plasma induzido – ICP-OES), colorimétricas e de espectrometria de radiação gama. A realização destas análises é justificada pela escassez de dados relacionados ao comportamento dos radionuclídeos e à classificação dos cambissolos nesta região. Ainda foram utilizados métodos estatísticos tais como a correlação de Pearson, os testes de ANOVA e Tukey, e as análises de componentes principais (PCA) e de componentes principais categóricos (CATPCA).

Para os solos estudados, os resultados demonstraram uma forte correlação entre as concentrações de carbono orgânico total (COT) e os radionuclídeos. Estes, principalmente os originados por *fallout* atmosférico, demonstraram uma distribuição vertical nos primeiros trinta centímetros nestes solos e uma boa correlação entre si, o que pode ser explicado pela sua distribuição horizontal bem semelhante no QF. Além disso, os radionuclídeos geogênicos demonstraram concentrações e um comportamento esperado para os solos originados a partir de rochas metamórficas.

Por fim, os resultados obtidos neste estudo demonstraram a eficácia dos métodos anteriormente mencionados. Além disso, os dados obtidos permitirão calcular as taxas de erosão e sedimentação não só na região do QF, como também em outras com características físicas, químicas e bióticas semelhantes.

Palavras-chave: Quadrilátero Ferrífero, Radionuclídeos, Cambissolos, Césio-137, Chumbo-210, Urânio-238

Abstract

This study aimed to inventory the ^{137}Cs , ^{210}Pb and ^{238}U in the surface horizons of preserved soils from Quadrilátero Ferrífero (QF) region, Minas Gerais state. It also intended to compare the horizontal and vertical distribution of these radionuclides between and along the cambisols of the following Conservation Units (CU) within this region: Parque Estadual do Rola Moça (RLM), Estação Ecológica de Fechos (FCH), Parque Nacional da Serra do Gandarela (GDR-1 and GDR-2), Reserva Particular do Patrimônio Natural da Serra do Caraça (CAR), Estação Ecológica de Arêdes (ARD), Floresta Estadual do Uaimiá (UAI), Parque Estadual do Itacolomi (ITA) and Parque Estadual da Serra de Ouro Branco (OBR).

The soils of these CU were sampled within 60 cm of depth profiles and analyzed by granulometry, mineralogical (powder X-ray diffractometry – XRD), chemical (inductively coupled plasma optical emission spectrometry – ICP-OES), colorimetric and spectrometry gamma radiation methods. The use of these methods is justified due to the scarcity of data related to the radionuclides behavior and the classification of the cambisols from this region. Moreover, statistical methods such as Pearson correlation, ANOVA and Tukey tests and principal component analysis (PCA) and categorical principal component analysis (CATPCA) were also performed.

For the studied soils, results showed a remarkable correlation between the concentrations of carbon organic total (COT) and the radionuclides. The latter, specifically the ones originated by atmospheric *fallout*, yielded vertical distribution in the first 30 cm of these soils. Moreover, *fallout*-derived radionuclides showed high correlation between them, which can be related to a similar horizontal distribution in the QF region. In addition, the geogenic radionuclides yielded amounts and showed the expected behavior for soils originated from metamorphic rocks.

Finally, the obtained results in this study proved the efficiency of the the chosen abovementioned methods. Furthermore, these data will also allow calculating the erosion and sedimentation rates not only in the QF region but also in regions with similar physical, chemical and biotic features.

Keywords: Quadrilátero Ferrífero, Radionuclides, Cambisols, Cesium-137, Lead-210, Uranium-238

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os solos são materiais complexos e fundamentais para o desenvolvimento da vida na Terra. Podem ser descritos como uma coleção de corpos naturais dinâmicos, que contém matéria viva, e que resultam da ação do clima e de organismos sobre um material de origem. Esse material, por sua vez, está relacionado de maneira mais ou menos sistemática com sua composição elementar, com o tamanho das partículas, e com sua mineralogia (McBride, 1994; Lepsch, 2002). Assim, quaisquer impactos ambientais que incidam sobre os solos, refletem direta ou indiretamente sobre os organismos vivos. Por essa razão, o interesse em diagnosticar e parametrizar estes impactos tem fomentado pesquisas voltadas para a busca de ferramentas que qualifiquem e quantifiquem as transformações ambientais, principalmente as de origem humana.

Dentre os impactos ambientais incidentes nos solos, destaca-se a erosão, que ao ser induzida por ações antrópicas, representa uma grande ameaça aos ciclos biogeoquímicos sustentados pelos solos em função das perdas de solo geradas pela ação da chuva, dos ventos, do tipo de cobertura vegetal e da topografia (Guerra *et al.*, 2007). Essas variáveis comportam-se de forma diferente em função da geografia da área afetada, e o seu conhecimento permite entender a evolução da paisagem e também prever as consequências de futuras transformações no uso do solo (Dosseto & Schaller, 2016).

Os métodos utilizados para calcular as taxas de perda de solo podem ser resumidos como diretos e indiretos. Os primeiros exigem longas aferições em campo, e dependem da instalação e/ou construção de coletores (Bertoni, 1949). Essas aferições em campo são elementares para validar modelos de simulação de erosão e de produção de sedimentos. No entanto, necessitam de um longo período para determinar algumas variáveis somente aplicáveis em áreas próximas aos experimentos (Santos, 2001; Correchel, 2003). Os indiretos utilizam variáveis empíricas e visam simplificar a metodologia e reduzir o tempo das experimentações de campo. Dentre os indiretos, a utilização de radionuclídeos tem sido aplicada com êxito para qualificar e quantificar a perda de solo e sua sedimentação (Walling, 1998; Zapata, 2002; Mabit *et al.*, 2008, Dosseto & Schaller, 2016).

A avaliação das taxas de erosão e de sedimentação utilizando radionuclídeos é baseada na comparação da atividade dos radionuclídeos em amostras de solo (erodido/sedimentado). A atividade de referência é obtida a partir de inventários. Estes correspondem ao estoque e distribuição dos radionuclídeos no perfil de solos não perturbados, ou seja, em locais onde a paisagem não tenha sido alterada por processos erosivos ou não tenha ocorrido sedimentação recente (Zapata, 2002; Dosseto & Schaller, 2016). Assim, o inventário reflete o total de entrada e de precipitação dos radionuclídeos, possibilitando a análise da perda de radioatividade e o decréscimo do estoque desses elementos em

camadas sucessivas de solo (Mabit *et al.*, 2008; Antunes, 2009). Os inventários são igualmente imprescindíveis para trabalhos e modelos de erosão e de produção de sedimentos (Ritchie & Mchenry, 1990; Andrello, 2004; Mabit *et al.*, 2008).

Os radionuclídeos têm se mostrado uma importante fonte de informação sobre mudanças ambientais nos solos (Navas, 2018) e o seu uso para realização de cálculos de erosão possui relevância global (Walling 1998). Entretanto, no hemisfério sul, os dados sobre a distribuição e comportamento dos radionuclídeos no solo ainda são escassos em comparação com os do hemisfério norte. (USDA 2008).

No Brasil, a primeira referência nacional sobre o uso de radionuclídeos em estudos de conservação dos solos foi o inventário de ^{137}Cs em solos da Bahia (Sakai 1977). Wilken *et al.* (1986) utilizaram o ^{137}Cs e ^{210}Pb para calcular o fluxo de sedimentos da Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro. Guimarães (1988) realizou o primeiro estudo da erosão e sedimentação usando o método da redistribuição de ^{137}Cs em solos do estado do Paraná. Em Minas Gerais foram verificados apenas três estudos envolvendo a realização de inventários de radionuclídeos: o primeiro foi realizado numa pequena área do município de Poços de Caldas e trata da redistribuição de solos a partir do ^{137}Cs (Andrello *et al.*, 1997); o segundo procurou explicar os processos de geração de transporte e de sedimentos na bacia do rio Indaiá a partir do ^{137}Cs (Macêdo, 2009); já no último foi realizada uma modelagem do transporte de solo em uma microbacia hidrográfica no município de Itaúna a partir do ^7Be (Esquivel *et al.*, 2017).

Essa escassez de dados no estado de Minas Gerais sobre a existência e comportamento dos radionuclídeos nos solos, levou à realização deste trabalho no Quadrilátero Ferrífero (QF), cenário de intervenções antrópicas ao longo de 300 anos, principalmente pela mineração. Além disso, as heterogeneidades climáticas, edáficas, geomorfológicas e geológicas, dessa região, a tornam um possível modelo de aplicação deste estudo em outras regiões. Por fim, descobrir a abundância e entender o comportamento físico-químico dos solos superficiais é imprescindível para identificar, calcular, prevenir e controlar impactos ambientais nesta região (Nishiyamamoto, 2014).

Diante disto, este trabalho propõe estudar a distribuição do ^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U em solos formados sobre algumas das principais litologias QF. Como tal, isto permitirá comparar o comportamento destes radionuclídeos sob diferentes aspectos geopedológicos e edáficos, em relação a outros locais, além de criar referências para futuras determinações de erosão e de sedimentação nesta região e em outras com características semelhantes.

1.1.1 – Radionuclídeos

Os nuclídeos ou isótopos são átomos distintos com número (prótons) e massa atômicas (prótons e nêutrons) específicos. Já os radionuclídeos ou isótopos radioativos, apresentam decaimento radioativo (Figura 1.1), ou seja, a transformação espontânea de um radionuclídeo pai em sucessivos radionuclídeos filhos, até se tornarem nuclídeos estáveis. Este decaimento dá-se a partir da meia-vida, que é um intervalo de tempo constante e necessário para se obter metade da quantidade de um radionuclídeo específico (Aieta *et al.*, 1987; Faure & Mensing 2005).

No decaimento alfa, o núcleo do átomo emite uma partícula alfa com dois prótons e dois nêutrons. Assim, quando um núcleo emite uma dessas partículas, seu número atômico diminui de duas unidades e o seu número de massa, de quatro unidades. O decaimento alfa reduz a razão próton nêutron (Z/N) do núcleo pai, trazendo este a uma configuração mais estável. No decaimento beta as partículas são elétrons ou pósitrons (antie elétrons). O decaimento beta ocorre quando, em um núcleo com muitos prótons ou muitos nêutrons, um próton ou um nêutron é transformado um no outro. No decaimento beta, um nêutron decai em um próton, um elétron e um antineutrino (Andrello, 2004).

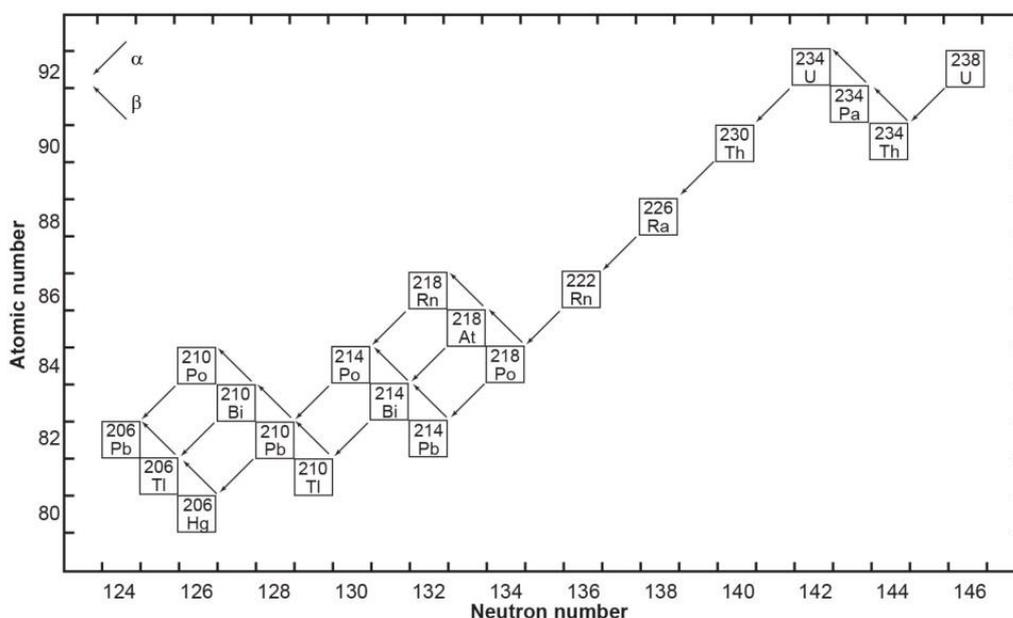


Figura 1.1 – A cadeia de decaimento do ^{238}U resultante da emissão sucessiva de partículas- α e partículas- β de isótopos intermediários. Faure & Mensing (2005).

1.1.1.1 – ^{137}Cs

O ^{137}Cs é um radionuclídeo artificial, produto da fissão nuclear do urânio-238 e plutônio-239. Foi introduzido no meio ambiente após testes nucleares de superfície realizados entre o início da década de 1950 e meados da década de 1970. Possui meia-vida de 30,23 anos, com decaimento β^- para o ^{137}Ba , com meia-vida de 2,55 minutos que se torna estável após a emissão de radiação γ de 0,66 MeV,

o qual, embora sendo emitido pelo bário-137, caracteriza o céσιο-137 (Figura 1.2 – Andrello *et al.*, 2003).

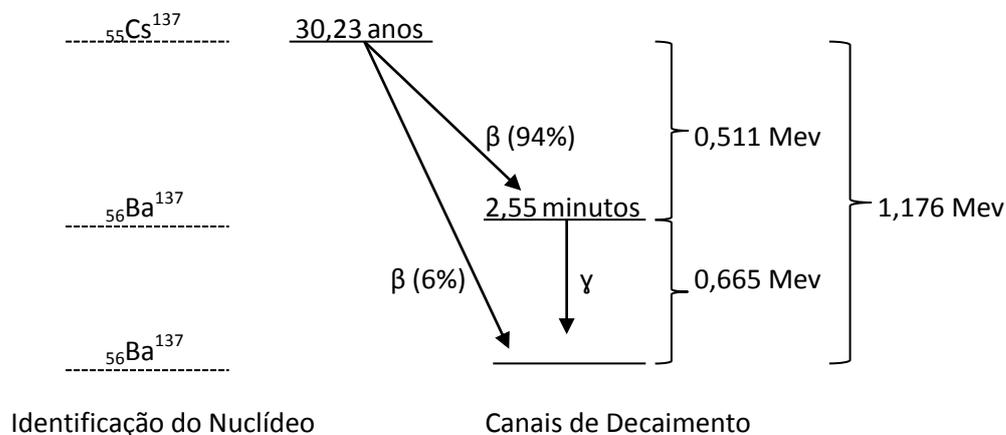


Figura 1.2 – Modelo de decaimento do ¹³⁷Cs.

A posição geográfica dos testes nucleares está intrinsecamente relacionada com as taxas de deposição do ¹³⁷Cs na superfície terrestre. Estas são mais altas no hemisfério norte porque é o local onde foram realizados os testes (Figura 1.3). Entretanto, em função da circulação inter-hemisférica, parte dos radionuclídeos foram transportados para o hemisfério sul (Schuch *et al.*, 1994). Além da maior deposição no hemisfério norte, ainda foi identificada uma menor concentração de ¹³⁷Cs em menores latitudes, em ambos hemisférios (Hutchison-Benson *et al.*, 1985; Schuch *et al.*, 1994, Andrello *et al.*, 2009, Antunes *et al.*, 2010; Montes *et al.*, 2013).

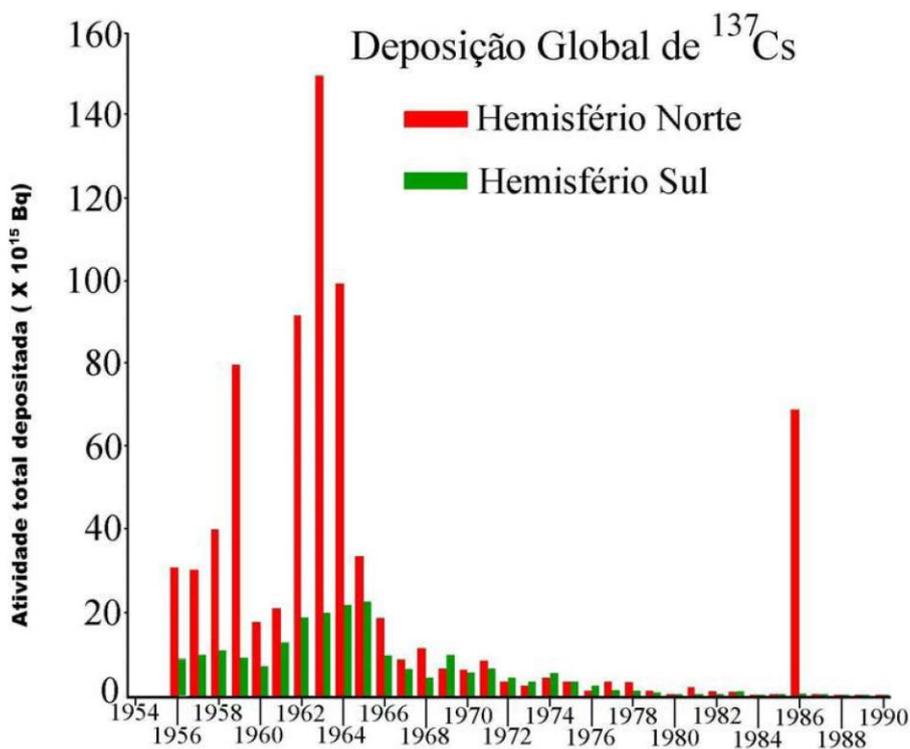


Figura 1.3 – Deposição global de ^{137}Cs devido ao “*fallout*” radioativo. Extraído de Antunes (2009).

Após sua precipitação radioativa, ou *fallout*, na superfície terrestre, o ^{137}Cs é adsorvido no solo, e permanece associado às argilas e à matéria orgânica até sua redistribuição (Guimarães & Andrello, 2001), que é associada à erosão, ao transporte e à deposição do solo devido à ação do vento das chuvas e dos rios (Antunes, 2009). O movimento inicial do ^{137}Cs depositado no solo é razoavelmente rápido devido à infiltração da água da chuva. Porém, a sua migração vertical é lenta devido à adsorção deste elemento nos primeiros centímetros do solo onde se deposita a maior parte do ^{137}Cs . Em solos minerais, ~90% do ^{137}Cs é encontrado nos primeiros cinco centímetros, e, em solos turfosos, onde a migração é mais rápida, entre 40-70% do ^{137}Cs é encontrado nesta camada (Andrello, 2004; Lauria *et al.*, 2007; Antunes 2009).

1.1.1.2 – ^{210}Pb

O ^{210}Pb é um radionuclídeo natural que representa parte da série de decaimento do ^{238}U . Resulta da decomposição do ^{226}Ra , encontrado em muitos solos e rochas (Mabit *et al.*, 2008). Devido à sua meia-vida curta (22,26 anos), o ^{210}Pb tem sido usado para simulações de modelos globais de transporte e de tempo de residência de aerossóis na atmosfera. Além disso, o ^{210}Pb também tem sido aplicado na geocronologia de sedimentos e permite determinar a taxa de erosão e redistribuição dos solos durante os últimos 100 anos (Nozaki *et al.*, 1978).

O ^{210}Pb é removido da atmosfera pela precipitação úmida ou seca (Figura 1.4), e, distribui-se no solo em profundidades que variam entre 1-40 cm (Nozaki *et al.*, 1978, Baskaran & Shaw, 2001; Andrello, 2004; Porto *et al.*, 2016). Porém, nem todo ^{210}Pb do solo é oriundo da precipitação, uma vez que parte do ^{222}Rn da crosta terrestre escapa na forma gasosa antes de decair, e outra parte forma o ^{210}Pb *in situ*. Esta constitui o ^{210}Pb suportado que possui atividade igual à do ^{226}Ra ¹. A parte do ^{222}Rn que escapa da crosta terrestre deposita-se por meio do *fallout* atmosférico e dá origem ao ^{210}Pb em excesso no solo (Figura 1.4). Este designa-se ^{210}Pb não suportado ou apenas de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. O ^{210}Pb total dos solos resulta da soma do ^{210}Pb suportado e do $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Figura 1.5). Por sua vez, para se calcular o $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, subtrai-se a atividade do ^{226}Ra da atividade total do ^{210}Pb (Baskaran & Naidu, 1995, Zapata, 2002).

¹ A presença de ^{226}Ra no solo deve-se principalmente à ocorrência de minerais de U e Th presentes nos solos e rochas adjacentes (Jaworowski, 1990).

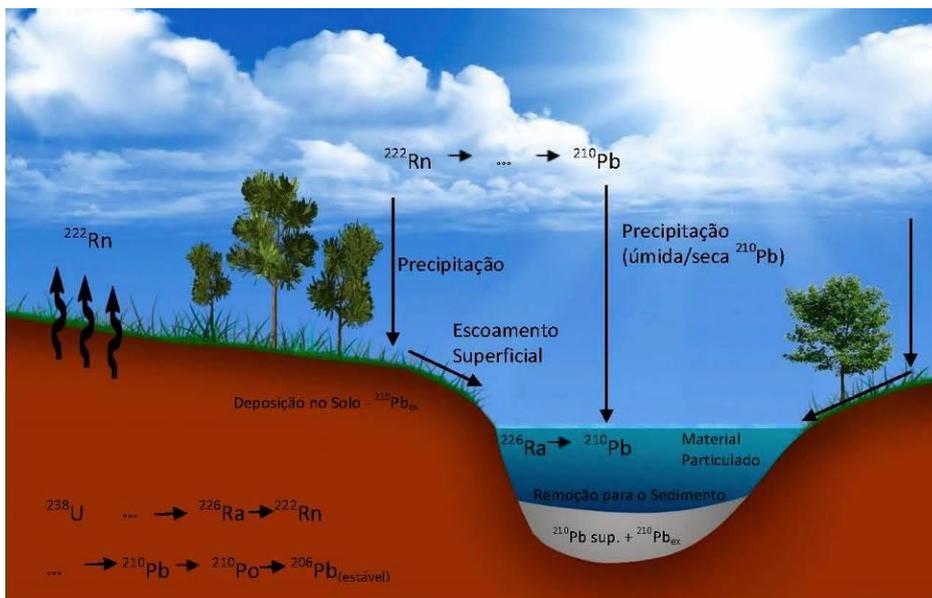


Figura 1.4 – Trajetória do ^{210}Pb atmosférico. Adaptado de Godoy (1998).

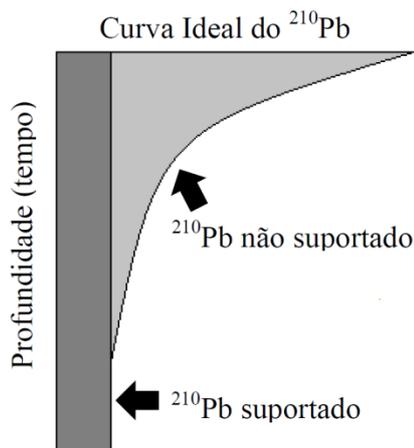


Figura 1.5 – Distribuição de ^{210}Pb no perfil de solo. Adaptado de Andrello (2004).

Lambert & Nezami (1965), em uma tentativa de estimar a deposição global do ^{210}Pb , afirmaram que este radionuclídeo possui o mesmo padrão de distribuição dos radionuclídeos artificiais, derivados de testes nucleares, sendo 50% do *fallout* oriundo da precipitação seca. Turekian *et al.* (1977) propuseram outro modelo de distribuição e atribuíram a imprecisão do modelo anterior ao fato dos produtos de fissão distribuírem-se globalmente na estratosfera, enquanto o ^{222}Rn e seus filhos (^{210}Pb) circulam, principalmente, na troposfera (Figura 1.6 a/b). Estes últimos ainda indicaram uma menor deposição por *fallout* do ^{210}Pb no hemisfério sul, corroborando modelos de deposição atuais (Figura 1.6 a/b – Baskaran, 2011; Persson, 2014, 2016).

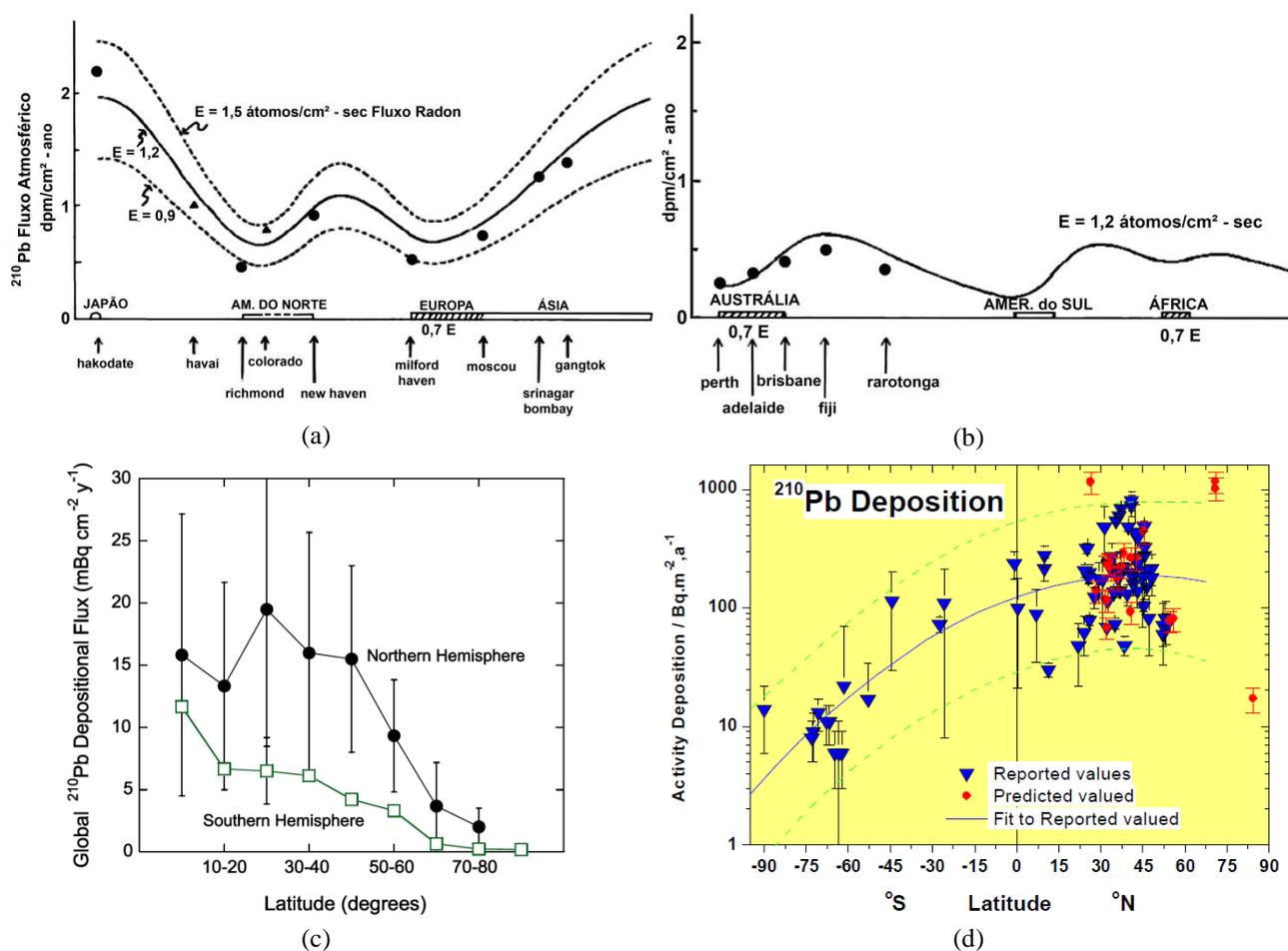


Figura 1.6 – Fluxos deposicionais atmosféricos de ^{210}Pb . (a) Distribuição no hemisfério norte, Turekian *et al.* ($n=9$); (b) Distribuição no hemisfério sul, Turekian *et al.* ($n=5$); (c) Distribuição no hemisfério norte e sul; Baskaran, 2011 ($n=167$), e, (d) Distribuição no hemisfério norte e sul, Persson, 2016 ($n=76$). Nesta figura os pontos vermelhos indicam valores obtidos por modelagens e os pontos azuis representam dados primários.

1.1.1.3 – ^{238}U

O ^{238}U é um radionuclídeo natural que se forma na crosta terrestre e ocorre em maior abundância em rochas graníticas e metamórficas (Rogers & Adams, 1978; Faure & Mensing 2005). As suas concentrações no ambiente dependem da fonte do radionuclídeo pai, do tempo de meia-vida do nuclídeo filho gerado e de condições físico-químicas do ambiente geoquímico, tais como pH e Eh. Estes fatores afetam a solubilidade e adsorção do radionuclídeo nos sedimentos ou nos solos e a dissolução da rocha-fonte (Aieta *et al.*, 1987; Paiva, 2008).

Altas taxas de ^{238}U podem ser verificadas em minerais portadores deste elemento que é fixado pela matéria orgânica, argilas e hidróxidos de ferro, alumínio e manganês (Langmuir, 1978; Rebelo *et al.*, 2002). A distribuição de ^{238}U num solo desenvolvido sobre rochas quartzo-feldspáticas mostra pouca variação na atividade deste radionuclídeo ao longo do perfil. No entanto, reflete a distribuição dos minerais de argila, principalmente nos perfis de alteração (Oliveira, 2007). A retenção de ^{238}U

nestes perfis deve-se à estabilidade de suas fases acessórias (Tabela 1.1), cujos produtos do intemperismo adsorvem este elemento (Rebelo *et al.*, 2002).

Tabela 1.1 – Teores de U em minerais de rochas ígneas

Minerais acessórios	U (ppm)	Minerais essenciais	U (ppm)
Allanita	30-700	Biotita	1-40
Apatita	5-150	Hornblenda	1-30
Epidoto	20-50	Feldspato Potássico	0,2-3
Ilmenita	1-50	Muscovita	2-8
Magnetita	1-30	Olivina	0,01
Monazita	500-3000	Plagioclásio	0,2-5
Titanita	100-700	Piroxênio	0,01-40
Xenotímio	500-35000	Quartzo	0,1-5
Zircão	300-3000		

Fonte: adaptada de Harmon & Rosholt, 1982.

A mensuração do ^{238}U normalmente é realizada por meio da detecção da radiação gama de seus filhos, uma vez que o este radionuclídeo emite radiação gama muito fraca (49,55 keV). Uma das possibilidades é o uso da radiação gama emitida pelo do filho ^{226}Ra , que possui uma meia-vida muito curta se comparada a do ^{238}U , e, portanto, o equilíbrio radioativo é rapidamente estabelecido (Mubarakmand *et al.*, 1977; Yucel, *et al.*, 2000).

1.2 – OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi construir um inventário de referência com as concentrações de ^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U presentes nos horizontes superficiais de solos do QF e aferir o comportamento destes radionuclídeos nos solos desta região. Para tal, foi necessário estabelecer objetivos secundários, que buscaram relacionar os indicadores de distribuição global dos radionuclídeos com o indicadores observados no QF, e, correlacionar essa distribuição com as variáveis do granulometria, mineralogia, e geoquímica do solo.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDO

2.1 – QUADRILÁTERO FERRÍFERO (QF)

O Quadrilátero Ferrífero (QF) situa-se no centro-sul de Estado de Minas Gerais. Suas serras, limitadas por bordas íngremes em um arranjo aproximadamente quadrangular, nomeiam essa região, que ocupa cerca de 7000 km² do extremo sul do Cráton São Francisco, e, que é internacionalmente reconhecida como uma das maiores províncias minerais do planeta. Suas riquezas minerais e as consequentes atividades mineiras desenvolvidas desempenharam um papel fundamental na ocupação do interior do Brasil, desde o século XVI (Ruchkys & Machado, 2013), e, nos dias atuais, o QF ainda é um dos pilares da economia do estado de Minas Gerais.

2.1.1 – Clima

O clima de Minas Gerais encontra-se sob o domínio da circulação do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, caracterizado por ventos predominantes do quadrante nordeste-este, nos baixos níveis da troposfera (CETEC, 1983; Guimarães *et al.*, 2009). A umidade provém do Oceano Atlântico e é transportada pelos ventos de Nordeste. Há também uma forte influência orográfica das Serras no transporte de umidade, em escala regional, promovendo taxas de precipitação elevadas nas regiões de maiores altitudes (Reboita *et al.*, 2015).

No QF, de forma geral, o clima é classificado como tropical semi-úmido, podendo ser dividido em duas unidades de Köppen: Cwa, presente na região do Alto Vale Rio das Velhas e na Depressão de Belo Horizonte, e Cwb, nas chamadas terras altas do QF (Alvares *et al.*, 2014). Ambos apresentam período quente e úmido entre janeiro e março, e frio e seco entre junho e agosto. Assim, são diferenciadas pela distribuição pluviométrica que sofre acréscimo gradativo de médias, sendo 1500 mm na Depressão de Belo Horizonte, 1600 mm na área do Alto Vale Rio das Velhas e mais de 2000 mm nos maciço quartzíticos próximos às bordas do QF (Guimarães *et al.*, 2009, Bezerra, 2014, Reboita *et al.*, 2015). Guimarães *et al.* (2009) avaliaram dados de 430 séries pluviométricas com período de duração de coleta mínimo de 15 anos, e dividiram o estado de Minas Gerais em 12 zonas homogêneas de pluviosidade (Tabela 2.1).

Seis destas zonas estão presentes no QF, sendo a menor pluviosidade média registrada na borda sul (1200 a 1400 mm), região onde se encontram os Parques Estaduais do Itacolomi (ITA) e da Serra de Ouro Branco (OBR). O Parque Nacional do Gandarela (GDR-1 e GDR-2), a Floresta do Uaimii (UAI) e a Estação Ecológica de Arêdes (ARD) estão submetidas às precipitações medianas desta região (1400 – 1700 mm). O Parque Estadual do Rola Moça (RLM) e a Estação Ecológica de Fechos (FCH), ao norte do QF recebem uma precipitação na ordem de 1600 a 1700 mm. Já a RPPN

Santuário do Caraça (CAR) está situada na região de maior pluviosidade do QF (>1850 mm – Figura 2.1).

Tabela 2.1 – Caracterização das áreas homogêneas de precipitação em Minas Gerais

Grupo	Estação chuvosa			Duração do ciclo (dias)	Precipitação anual (mm)	Classe de precipitação (mm)
	Início	Pico	Final			
1	15/nov.	11/jan.	6/mar.	111	738	< 800
2	8/nov.	11/jan.	12/mar.	124	824	800 a 900
3	2/nov.	13/jan.	22/mar.	140	939	900 a 1.000
4	27/out.	14/jan.	29/mar.	153	1.046	1.000 a 1.100
5	23/out.	15/jan.	3/abr.	162	1.163	1.100 a 1.200
6	22/out.	18/jan.	9/abr.	169	1.258	1.200 a 1.300
7	20/out.	20/jan.	16/abr.	178	1.359	1.300 a 1.400
8	18/out.	21/jan.	18/abr.	182	1.431	1.400 a 1.500
9	15/out.	22/jan.	22/abr.	189	1.522	1.500 a 1.600
10	14/out.	23/jan.	27/abr.	195	1.613	1.600 a 1.700
11	12/out.	25/jan.	1/maio	201	1.753	1.700 a 1.850
12	2/out.	21/jan.	7/maio	217	1.989	> 1.850

Fonte: adaptada de Guimarães *et al.* (2009).

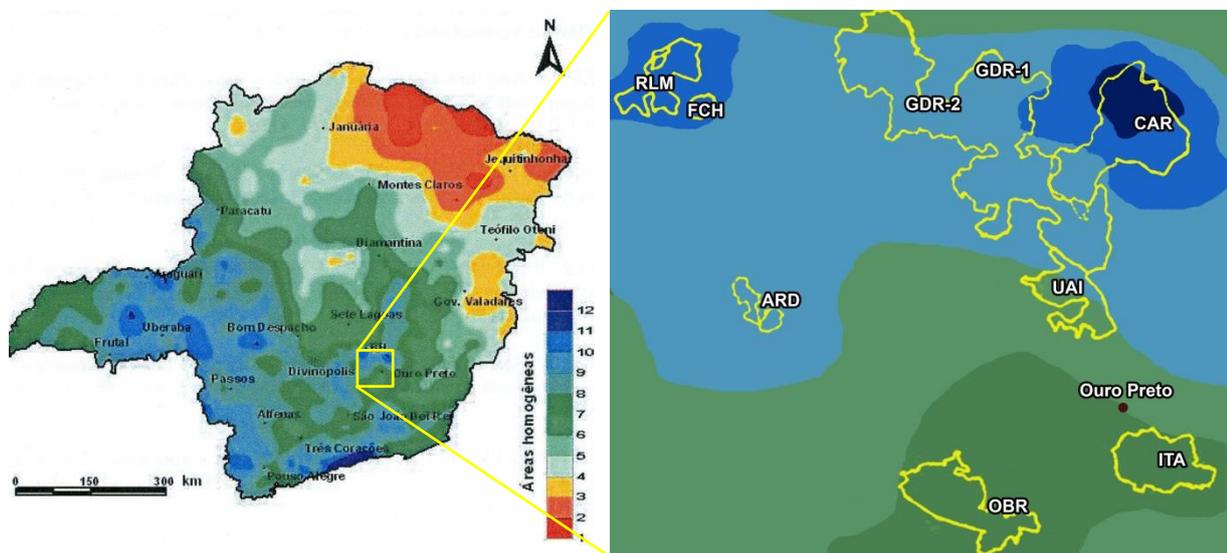


Figura 2.1 – Distribuição espacial das áreas homogêneas de precipitação de Minas Gerais (Guimarães *et al.*, 2009).

2.1.2 – Geologia

A geologia observada atualmente no QF, com pacotes rochosos de idades muito diversas aflorando lado a lado (Figura 2.2), é consequência de processos geológicos complexos e superpostos,

iniciados pela formação de bacias sedimentares antigas, que sofreram orogêneses sucessivas tanto no Arqueano quanto no Proterozoico (Alkmim & Marshak, 1998). Como consequência, os indícios dos processos se confundem, dificultando a identificação e compreensão de cada um deles em separado, e tornam a reconstituição dos fatos um verdadeiro quebra-cabeça (Hasui *et al.*, 2012).

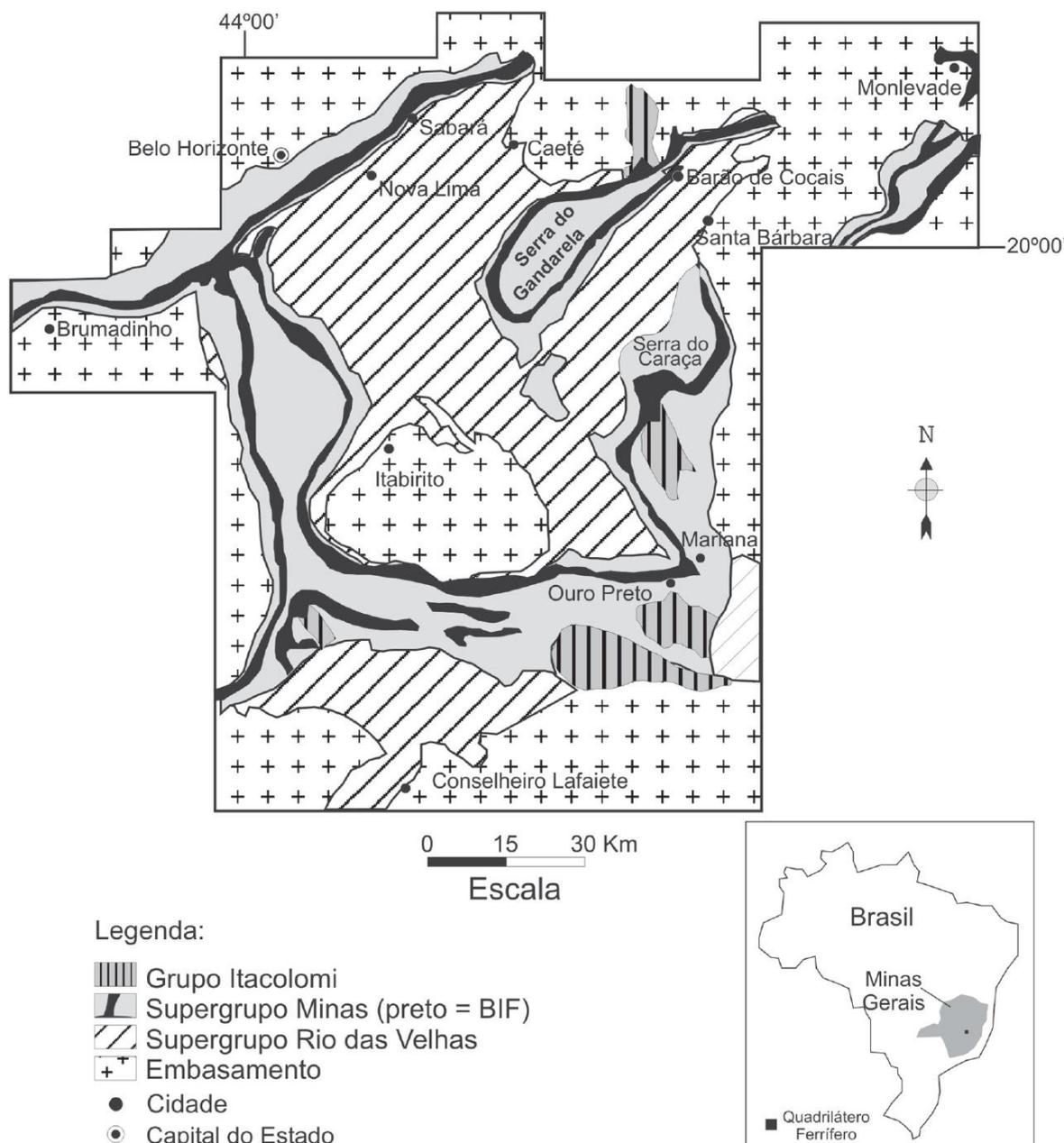


Figura 2.2 – Mapa Geológico do QF. Modificado de Alkmim & Marshak (1998).

A primeira classificação estratigráfica do QF foi proposta por Harder & Chamberlin (1915), posteriormente modificada por Dorr II (1969), por Ladeira (1980) e por Marshak & Alkmim (1989). Basicamente, as unidades litoestratigráficas que compõem o QF são o Complexo Metamórfico de Base, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi (Figura 2.3).

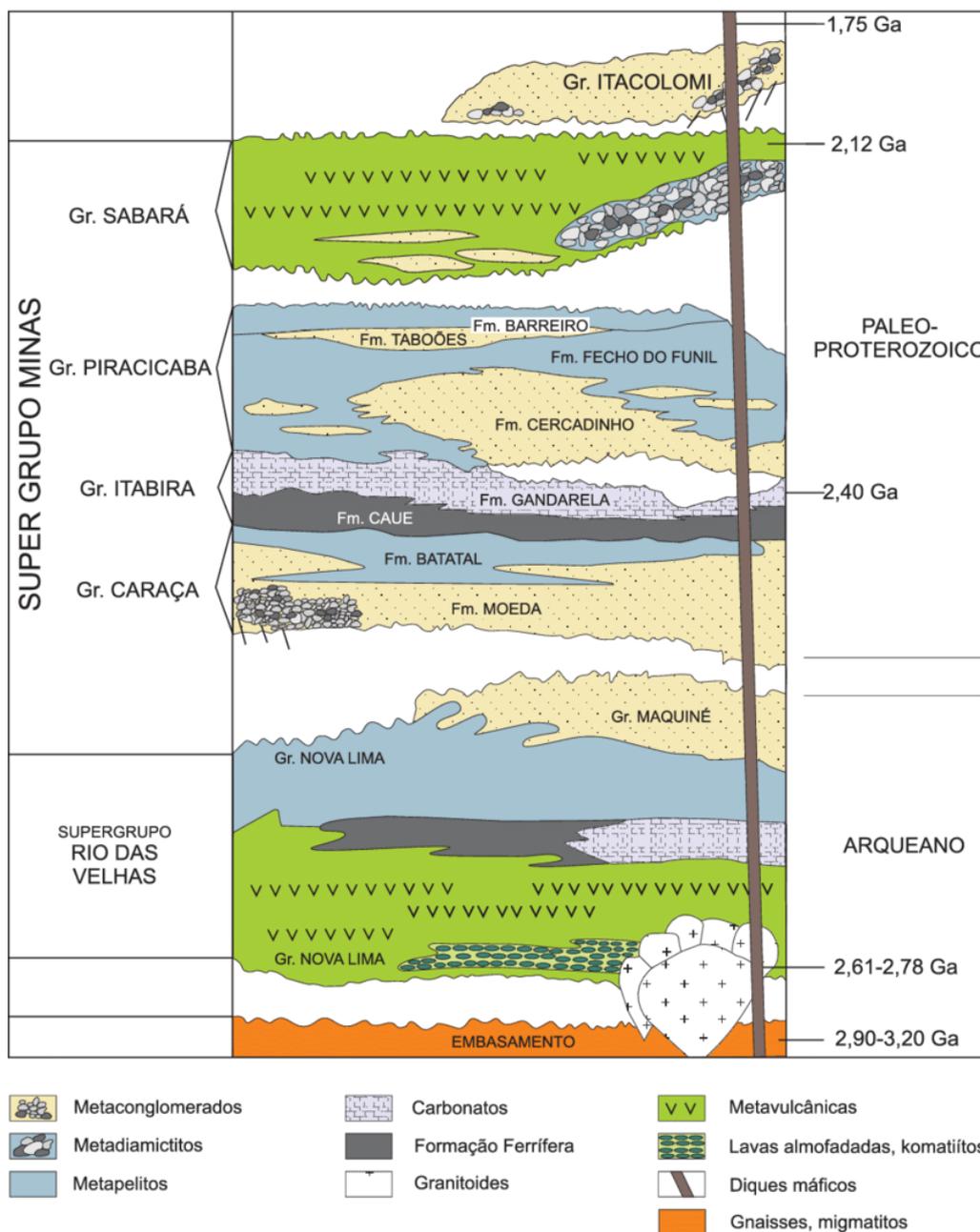


Figura 2.3 – Coluna estratigráfica do QF. A direita da coluna representa os relacionamentos na parte leste do QF, enquanto o lado esquerdo do gráfico representa os relacionamentos no parte ocidental do QF. Modificado de Alkmim & Marshak (1998) por Ruchkys (2009).

O Complexo Metamórfico de Base é constituído por rochas cristalinas arqueanas com idades entre 3,28 e 2,61 bilhões de anos (Carneiro, 1992; Salgado, 2006). Estas se apresentam na forma de estruturas dômicas e formam os complexos de Bonfim, Moeda, Congonhas, Santa Rita Caeté e do Bação. O embasamento é composto basicamente por rochas gnáissico-migmatíticas polideformadas, de composição tonalítica a granítica e, subordinadamente, de granitos, granodioritos, anfibolitos e ultramáficas (Carneiro, 1992; Salgado, 2006; Andrade, 2008).

O Supergrupo Rio das Velhas é composto por seqüências metavulcano-sedimentares arqueanas do tipo *greenstone belt* de idade aproximada entre 2,7 e 2,8 bilhões de anos (Machado *et al.*, 1992). A seqüência estratigráfica é formada pelos grupos Nova Lima, Maquiné e Quebra Ossos. O primeiro é composto por rochas extrusivas básicas e félsicas, metagrauvas, quartzitos, formações ferríferas bandadas do tipo Algoma, dolomitos quartzosos e metaarenitos quartzosos; o segundo por seqüências de filitos e filitos quartzosos da Formação Palmital, e pelas seqüências de xisto quartzoso, metaconglomerados, filitos e metagrauvas da Formação Casa Forte; o último é formado por pacotes de komatítos e basaltos, lavas riolíticas e rochas sedimentares que incluem, além de formações ferríferas bandadas (BIFs), rochas carbonáticas e rochas silisiclásticas, xistos e filitos (Gair 1962; Dorr II 1969; Noce *et al.*, 1998; Zucchetti *et al.*, 2000a; 2000b; Noce *et al.*, 2005; Salgado, 2006; Romano *et al.*, 2013).

O Supergrupo Minas é constituído por seqüências supracrustais Proterozóicas que variam de 2,10 a 2,42 bilhões de anos (Machado *et al.*, 1992; Babinski *et al.*, 1993; Alkmin & Marshak, 1998). Este Supergrupo divide-se nos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. O Grupo Caraça se subdivide nas formações Moeda (constituída por metaconglomerados e quartzitos) e Batatal (constituída por filitos sericíticos e grafitosos, metachertes e psamitos) e apresenta sedimentos clásticos de granulometria fina, seixos e matações. O Grupo Itabira subdivide-se nas formações Cauê (constituída por itabiritos, filitos e formações ferríferas bandadas) e Gandarela (constituída por mármore dolomíticos, filitos dolomíticos, itabiritos dolomíticos, filitos e metaconglomerados). O Grupo Piracicaba é composto por cinco unidades clásticas – Formação Cercadinho (constituída por quartzitos e filitos intercalados), Fecho de Funil (constituída por filitos dolomíticos, filitos siliciosos, dolomitos siliciosos e quartzitos ferruginosos), Taboões (constituída por quartzitos lenticulares, de granulação muito fina), Barreiro (constituída por filitos negros, intercalados com xistos e filitos sericíticos) e Sabará (constituído por uma espessa camada de turbiditos, tufos vulcânicos e diamictitos) (Dorr II 1969; Machado *et al.*, 1992; Renger *et al.*, 1994; Machado *et al.*, 1996; Rosière *et al.*, 2000; Lana *et al.*, 2013).

Por fim, o Grupo Itacolomi, composto por quartzitos e metaconglomerados, separado do Supergrupo Minas por uma discordância angular e erosional com cerca de 2,1 bilhões de anos (Machado *et al.*; 1993, Guimarães, 1931; Andrade, 2008).

2.1.3 – Gemorfologia

O relevo do QF é o resultado da relação entre a litoestrutura, soerguimentos epirogenéticos e processos erosivos (Dorr II, 1969; Varajão *et al.*, 2009). As áreas mais elevadas, além de terem sofrido soerguimento, têm por substrato as rochas mais resistentes à denudação (i.e., itabiritos, quartzitos), as intermediárias xistos e filitos, e as mais baixas são moldadas pelas rochas graníticas que possuem

menor resistência ao intemperismo e a erosão (Varajão, 1991; Salgado, 2006; Varajão *et al.*, 2009) (Figura 2.4).

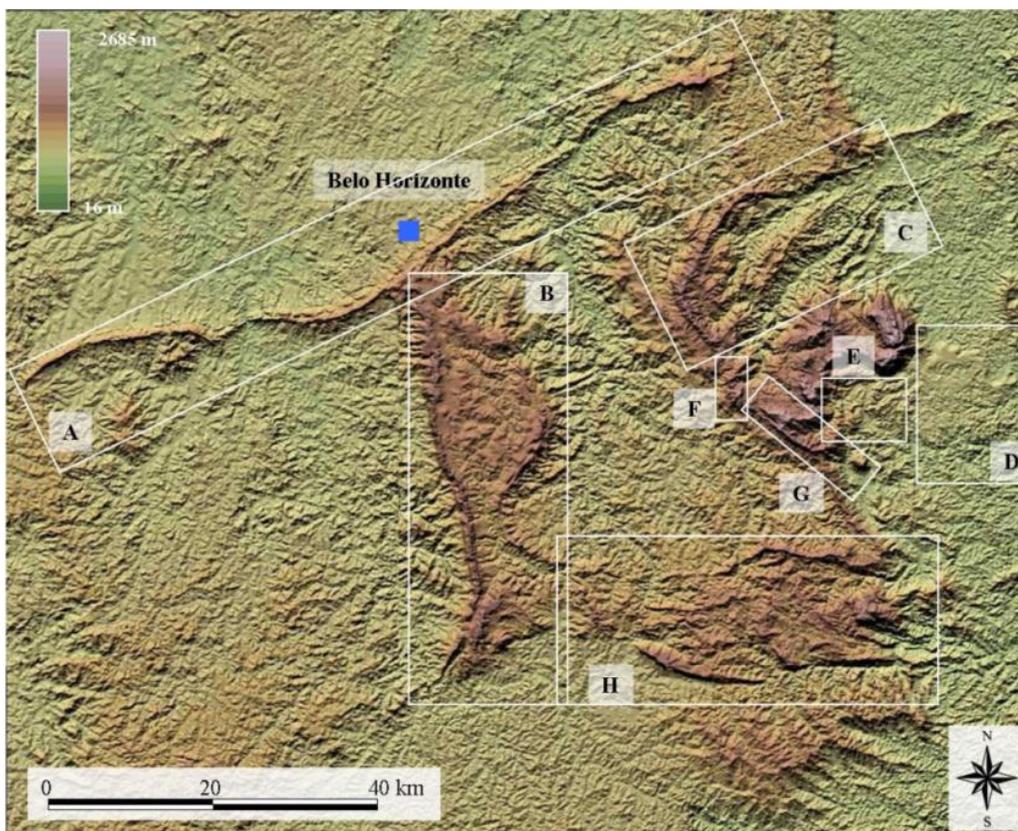


Figura 2.4 – Relevo do QF. Legenda: A: Serra do Curral; B: Sinclinal Moeda; C: Sinclinal Gandarela; D: Chapada de Canga; E: Sinclinal Alegria; F: Sinclinal Ouro Fino; G: Sinclinal Conta Historia; H: Sinclinal Dom Bosco (Carmo, 2010).

2.1.4 – Pedologia

Assim como ocorre com a geologia, a pedologia do QF também é complexa, já que ainda reflete as variações derivadas da pedogênese (físicas, químicas e biológicas) e da evolução da paisagem regional (erosão, transporte e deposição de materiais). Os solos menos evoluídos do QF, como os Cambissolos e os Neossolos, ainda possuem grande parte de suas características associadas ao material de formação. Por outro lado, diversos dos solos mais evoluídos, como os Argissolos e os Latossolos, apresentam materiais coluvionares associados à sua formação, o que os torna mais complexos e de difícil caracterização (CETEC, 1983; Costa, 2003; Carvalho Filho *et al.*, 2011). Por sua vez, essa complexidade, associada à abundância de recursos minerais do substrato geológico e baixa aptidão agrícola, têm direcionado as poucas pesquisas pedológicas a assuntos específicos e a pequenos trechos da paisagem regional (Carvalho Filho *et al.*, 2011). Neste sentido, também são escassos estudos que remetem à mineralogia e à geoquímica dos solos, especialmente no que tange aos elementos instáveis.

Shinzato & Carvalho Filho (2005), responsáveis pelo mais representativo levantamento pedológico realizado no QF, descreveram onze principais subordens de solos na porção norte desta região, sendo: (1) Argissolos Vermelhos, dominantes nas áreas de relevo montanhoso e forte ondulado, e comuns sob floresta tropical subperenifólia; (2) Argissolos Vermelho-Amarelos, com ocorrência menos expressiva que os anteriores, encontram-se em relevo que varia de ondulado a montanhoso, sob o mesmo tipo de vegetação; (3) Cambissolos Háplicos, os solos mais comuns no QF e que se distinguem pelo baixo grau de desenvolvimento pedogenético, sendo comuns nas regiões de maior altitude, sob floresta tropical subperenifólia e em relevo montanhoso a fortemente ondulado; (4) Gleissolos Melânicos, solos mal drenados com lençol freático elevado por longos períodos, possuem pouca representatividade no QF e localizam-se em áreas de topografias mais baixas e cobertas por vegetação higrófila, representada pelo campo tropical higrófilo de várzea; (5) Gleissolos Háplicos, diferenciam-se dos anteriores por apresentarem horizonte superficial menos desenvolvido; (6) Latossolos Vermelhos, com grande expressão regional, dividem-se nas subordens Distróficos, Perféricos, Ácricos e Acriféricos. São solos muito evoluídos, resultantes de enérgicas transformações no material constitutivo; (7) Latossolos Vermelho-Amarelos, dividem-se em Perféricos e Ácricos e diferenciam-se dos anteriores pela sua matiz de coloração; (8) Neossolos Flúvicos, solos pouco evoluídos, não-hidromórficos, formados em terraços de deposição aluvionar recente, referidos ao Quaternário, ou seja, as planícies aluvionares; (9) Neossolos Litólicos, envolve solos minerais pouco desenvolvidos, rasos, com elevados teores de minerais primários. Comuns nas áreas de relevo mais movimentado, sob vegetação de campo tropical. (10) Neossolos Regolíticos, normalmente, apresentam fragmentos de rochas semi-intemperizadas, podem ser encontrados, eventualmente, ocupados com vegetação de campo cerrado tropical, campo tropical e capoeiras; e, (11) Plintossolos Pétricos, compreendem solos de drenagem variável, nos quais há excesso d'água ou temporário ou por um período prolongado durante o ano. Ocorrem em superfícies planas com predomínio de gramíneas.

Dentre as variáveis utilizadas para distinguir os solos, destacam-se a composição química e mineralógica dos mesmos. Nishiyamamoto (2014), ao pesquisar sobre a abundância e distribuição de elementos químicos em solos superficiais do QF, verificou que estes solos possuem elevadas concentrações de Al, As, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Sb, Se, Si e Ti, e, que estes elementos ocorrem nos solos de maneira natural, sendo suas concentrações dependentes primariamente do material de origem e consequência da atuação dos processos pedogênicos. Segundo a autora, solos originados a partir das rochas granito-gnáissicas do Complexo Metamórfico possuem altos teores de Al, Be, Li, Sc, Y e Zr e, entre os principais minerais presentes estão o quartzo, a muscovita, a dolomita e a hematita. Por seu turno, os solos originados a partir das rochas do Supergrupo Rio das Velhas apresentam altas concentrações de Ca, Co, Cr, Cu, Mg, Ni, V e Zn, e, quartzo, muscovita, caulinita, hematita, gibbsita, goethita, dolomita, rutilo e illita como os principais minerais que os constituem. No Supergrupo Minas, as concentrações mais relevantes são de Ag, B, Bi, Cd, Fe, Mn, P, Pb, S e Ti, e, no que diz

respeito à mineralogia, destacam-se quartzo, gibbsita, hematita, goethita, magnetita, muscovita, caulinita, dolomita, rutilo e illita. Por fim, no Grupo Itacolomi foram verificadas altas concentrações dos elementos Ba, K, Na, Si, Sr e Th e os minerais quartzo, muscovita, caulinita, gibbsita, dolomita e hematita.

2.2 – UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

Por definição, Unidades de Conservação (UC) são espaços territoriais com características ecológicas, científicas, florísticas, faunísticas e paisagísticas relevantes, legalmente instituídas pelo Poder Público, com objetivos de conservação. Possuem limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção. Distribuídas de norte a sul do QF, são mais de trinta unidades de conservação divididas entre unidades de proteção integral e de uso sustentável (BRASIL, 2000).

Para este trabalho foram escolhidas oito UC com base em sua distribuição geográfica no QF, em sua classificação de proteção integral e pela tipologia de solos presente no âmbito da UC (Figura 2.5). Os pontos de amostragem foram definidos com base na pedologia destas UC, sempre em cambissolos.

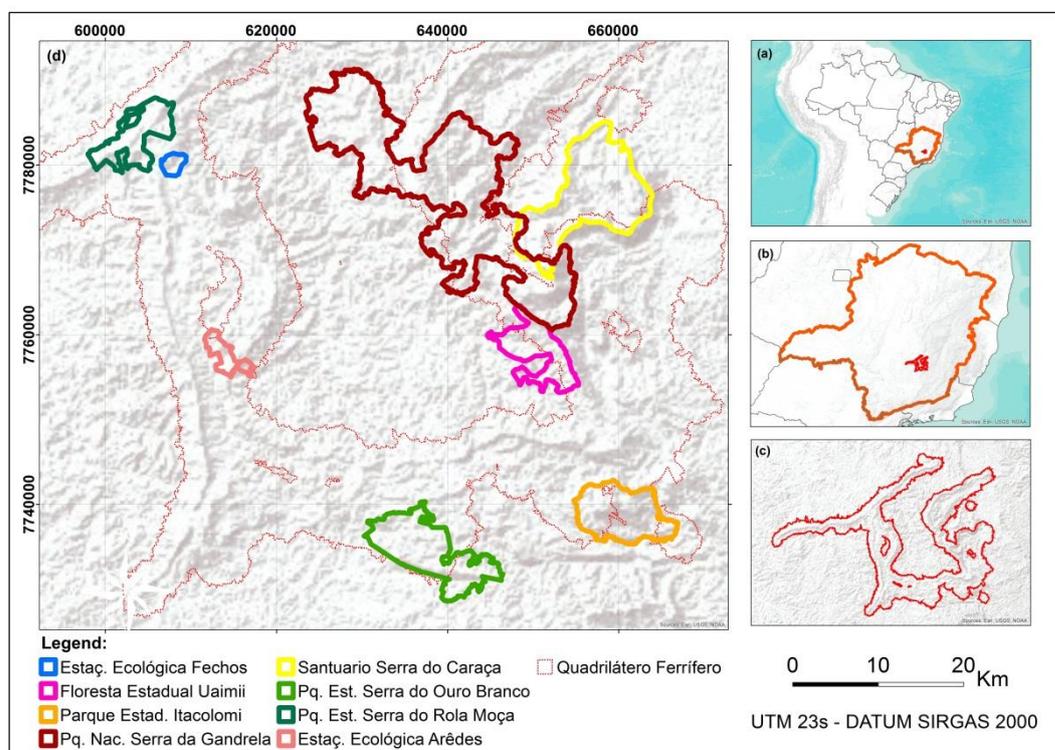


Figura 2.5 – Localização das Unidades de Conservação (UC) alvo da coleta de amostras.

2.2.1 – Parque Estadual do Rola Moça

O Parque Estadual da Serra do Rola Moça (RLM) foi criado em 27 de setembro de 1994 pelo Decreto Estadual nº 36.071 (MINAS GERAIS, 1994b). Abrange 39,42 km², localizado nos municípios de Belo Horizonte, Nova Lima, Ibirité e Brumadinho (Figura 2.6).

O relevo montanhoso predomina no RLM, que está localizado na confluência das Serras do Curral e da Moeda, de direção WSW-ENE. Ao sul, podem ser vistas escarpas serranas; no noroeste, morros e serras baixas, e na parte central, chapadas e platôs quase sempre associados às exposições de canga (Oliveira, 2017). Essas serras são constituída por rochas dos Grupos Nova Lima, no flanco oeste, Caraça (rochas das Formações Moeda e Batatal) e Itabira (rochas das Formações Cauê e Gandarela), no flanco sul da Serra da Moeda. Depósitos de coberturas cenozóicas recobrem discordantemente as sequências estratigráficas mencionadas e são constituídos por canga, argila terciária e colúvio vermelho (Alkmim, 1996; IEF, 2007; Madeira, 2018).

A relação entre as litologias e os solos predominantes do RLM pode ser estabelecida em três associações distintas (Shinzato & Carvalho Filho, 2005 – Figura 2.6): (1) Rochas do Grupo Nova Lima/Cambissolos; (2) Rochas do Grupo Caraça/Afloramentos Rochosos + Neossolos Litólicos Distróficos típicos; e (3) Rochas do Grupo Itabira/Neossolos + Cambissolos. Na primeira associação, os Cambissolos podem ser agrupados em duas unidades: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, com textura média cascalhenta ou média/argilosa cascalhenta, horizonte A moderado com fase pedregosa e endopedregosa, distribuído em relevo montanhoso e forte ondulado; e Cambissolo Háptico Tb Distrófico léptico ou lítico com textura variando de média e argilosa a muito cascalhenta, fase pedregosa e epipedregosa + Neossolo Litólico Distrófico típico com textura média muito cascalhenta ou argilosa muito cascalhenta, fase pedregosa. Ambos possuem horizonte A moderado e estão presentes em relevos montanhosos e fortemente ondulados. Na segunda, os Afloramentos Rochosos estão associados aos Neossolos Litólicos Distróficos típicos de textura média cascalhenta ou arenosa cascalhenta, com horizonte A moderado, fase pedregosa e rochosa. Ocorrendo em relevos montanhosos e fortemente ondulados. Na terceira e última associação, os Neossolos e os Cambissolos estão divididos, cada um, em três subcategorias. Os Neossolos em Neossolo Litólico Distrófico típico, fase pedregosa, campo tropical + Cambissolo Háptico Perférico léptico ou típico, textura média cascalhenta; ambos textura média cascalhenta, horizonte A moderado, relevo montanhoso e forte ondulado; Neossolo Litólico Distrófico típico, fase campo tropical + Cambissolo Háptico Perférico léptico ou lítico, ambos textura média cascalhenta com horizonte A moderado, fase pedregosa e com ocorrência em relevo montanhoso e escarpado; e Neossolo Litólico Distrófico típico, textura média cascalhenta, horizonte A moderado, fase pedregosa, campo tropical + Afloramentos de Rocha, ambos relevo escarpado e montanhoso. Por sua vez, os Cambissolos são divididos em Cambissolo Háptico Perférico típico, textura média cascalhenta ou média pouco cascalhenta/média cascalhenta, fase pedregosa e endopedregosa; floresta tropical subperenifólia + Latossolo Vermelho Perférico câmbico ou típico; textura argilosa/argilosa pouco cascalhenta, fase endopedregosa, ambos com horizonte A

moderado; relevo forte ondulado e montanhoso; Cambissolo Háplico Perférico petroplúntico, textura média muito cascalhenta, fase campo cerrado tropical + Latossolo Vermelho Perférico petroplúntico, textura argilosa muito cascalhenta ou média muito cascalhenta, ambos com horizonte A moderado, fase pedregosa, relevo ondulado e suave ondulado; e, Cambissolo Háplico Perférico petroplúntico, fase campo tropical + Neossolo Litólico Distrófico típico, substrato rochas ferríferas ambos textura média cascalhenta, horizonte A moderado, fase pedregosa, relevo suave ondulado e ondulado. Ainda sobre o Grupo Itabira existem exposições de canga sobre relevo forte ondulado a ondulado e em platôs na região central do RLM.

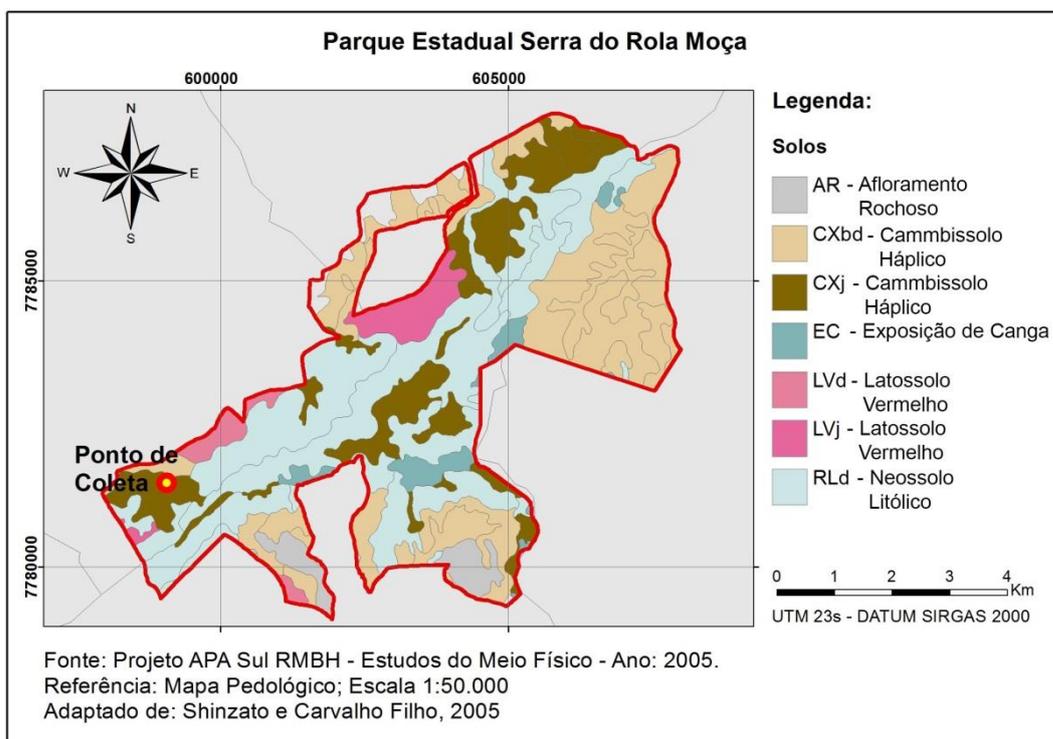


Figura 2.6 – Mapa de solos do Parque Estadual da Serra do Rola Moça – RLM. Modificado de Shinzato & Carvalho Filho (2005).

2.2.2 – Estação Ecológica de Fechos

A Estação Ecológica de Fechos (FCH) foi criada em 27 de setembro de 1994 pelo Decreto Estadual nº 36.073 (MINAS GERAIS, 1994b). Abrange 6,03 km², situa-se próxima à confluência das Serras do Curral e Moeda, no município de Nova Lima (Figura 2.7).

A configuração geológica da FCH é semelhante à do RLM, afloram os Grupos Nova Lima, Caraça e Itabira (Alkmim, 1996; IEF, 2007). No entanto, segundo Shinzato & Carvalho Filho (2005), as associações litologias/solos predominantes são distintas. As rochas do Grupo Nova Lima são cobertas por Cambissolos do tipo Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico; textura média cascalhenta ou média/argilosa cascalhenta; horizonte A moderado; fase pedregosa e endopedregosa. As rochas do

Grupo Caraça estão associadas a Cambissolos Háplicos Tb Distróficos típicos, textura média cascalhenta ou média/argilosa cascalhenta, horizonte A moderado; fase pedregosa e endopedregosa, floresta tropical subperenifólia, relevo montanhoso e forte ondulado. As rochas do Grupo Itabira são cobertas por Neossolos Litólicos, geralmente associados aos Cambissolos nas porções menos íngremes do relevo. Estes Neossolos são subdivididos em: Neossolos Litólicos Distróficos típicos, fase floresta tropical subperenifólia + Cambissolos Háplicos Perféricos típicos, substrato rochas ferríferas, ambos textura média cascalhenta, horizonte A moderado, fase pedregosa, relevo montanhoso e escarpado; e Neossolos Litólicos Distróficos típicos, textura média cascalhenta, horizonte A moderado, campo tropical, relevo escarpado. Estes Neossolos ainda podem estar associados aos Cambissolos originados do Grupo Caraça.

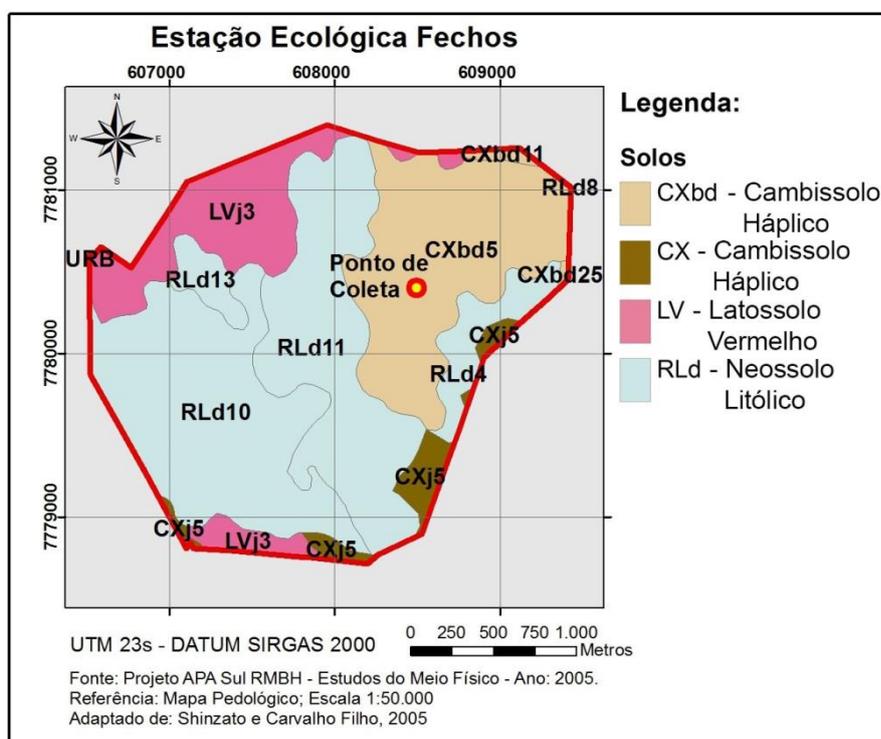


Figura 2.7 – Mapa de solos da Estação Ecológica de Fechos – FCH. Modificado de Shinzato & Carvalho Filho (2005).

2.2.3 – Parque Nacional da Serra do Gandarela

O Parque Nacional da Serra do Gandarela (GDR) foi criado pelo Decreto Federal de 13 de outubro de 2014 (BRASIL, 2014). A área abrange cerca de 312 km² entre os municípios de Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, Itabirito e Rio Acima (Figura 2.8).

Na área do GDR ocorrem os litotipos dos Supergrupos Minas (filitos, itabiritos, metaconglomerados) e Rio das Velhas (quartzitos, metaarenitos, filitos). Em termos estruturais, a área é marcada pelo Sinclinal Gandarela que se orienta segundo a direção NE-SW (Dorr II 1969, Ruchkys, 2007; Lamounier *et al.*, 2011).

Os solos do GDR apresentam um alto teor de óxidos de ferro influenciados pelos itabiritos da Formação Cauê, muito comuns na área. Solos formados sobre esses substratos são considerados poligenéticos, influenciados por fenômenos de morfogênese, durante períodos secos, e de pedogênese, durante períodos úmidos (Fig. 3.8; Shinzato & Carvalho Filho, 2005; Reis *et al.*, 2014).

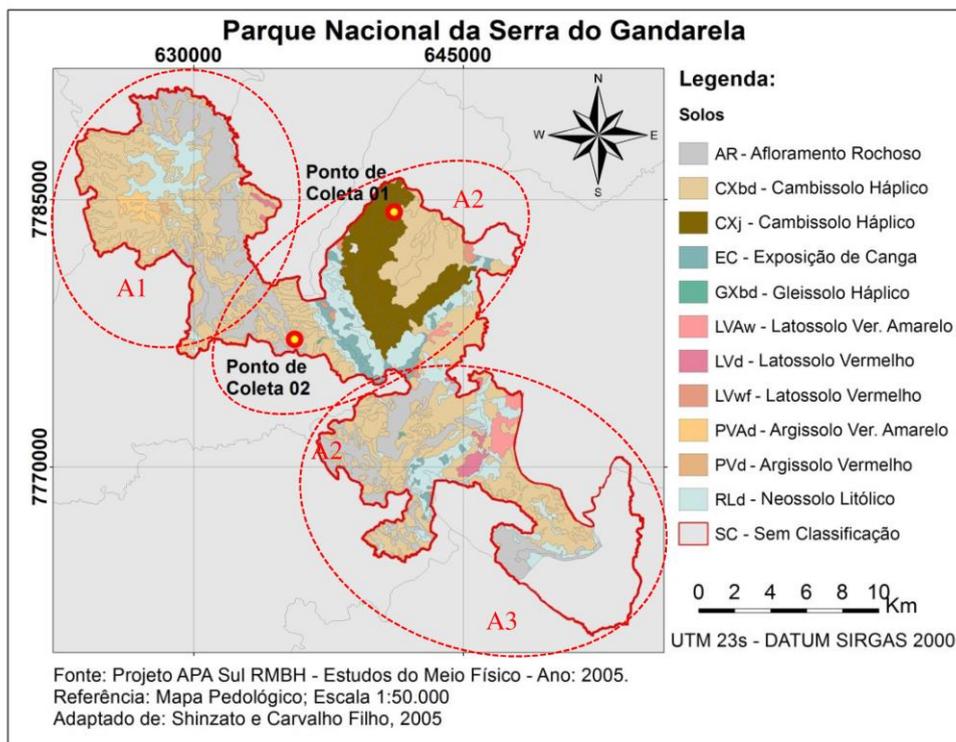


Figura 2.8 – Mapa de solos do Parque Nacional da Serra do Gandarela – GDR. Modificado de Shinzato & Carvalho Filho (2005).

Em função do tamanho do GDR, seu perímetro foi dividido em três áreas (A1, A2, A3), para facilitar a descrição (Figura 2.8). A primeira área, A1, situa-se a noroeste, próxima ao município de Raposos e nela predominam Neossolos Litólicos Distróficos Típicos (RLd). Nas suas cotas mais elevadas, os relevos são maioritariamente ondulados e montanhosos. Este tipo de solo predomina na parte leste, onde os relevos são mais escarpados, e é associado a Afloramentos Rochosos (AR). Com a redução das altitudes e nas proximidades do município de Rio Acima, os Neossolos Litólicos vão dando lugar aos Cambissolos Hápticos Tb Distróficos (CXbd), e aos Latossolos Vermelhos Distróficos Típicos (PVd) e Vermelho-Amarelos Distróficos Típicos (PVAd). A A2 é a área central, situa-se a oeste da Sinclinal Gandarela (SiG) e nela predominam os mesmos CXbd associados aos RLd, em áreas com maior declive. A cumeeira da Serra do Gandarela é coberta pelos Afloramentos de Canga (EC) e pelos RLd, por vezes associados a Latossolos Vermelhos Ácricos (LVw). Ao leste da SiG, em cotas inferiores àquelas que ocorrem os Neossolos Litólicos, predominam Cambissolos Hápticos Perféricos típicos (CXj) com altos teores de Fe e Mn. A A3 situa-se a sul, próxima à Serra

do Caraça (SeC), e nela predominam os CXbd. Estes estão associados a outros tipos de Cambissolos, Latossolos Vermelho-Amarelos (LVAw), Latossolos Vermelhos Distróficos (LVd) e aos AR.

2.2.4 – Reserva Particular do Patrimônio Natural da Serra do Caraça

A Reserva Particular do Patrimônio Natural Santuário do Caraça (CAR) foi reconhecida como UC por meio da Portaria do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), nº 32, de 30 de março de 1994 (BRASIL, 1994). A CAR abrange uma área de 101,87 km² e está localizada nos municípios de Santa Bárbara e Catas Altas (Figura 2.9).

Em termos de litologia, predominam as rochas do Grupo Caraça, representado pela Formação Moeda, em quase toda extensão da CAR. No extremo norte, predominam rochas dos Grupos Maquiné e Nova Lima. Na porção sudoeste, rochas do Grupo Maquiné e um Depósito Aluvial Recente formado por areia, argila e Cascalho (Qal). Além destas litologias, toda a CAR é permeada por diques de gabro e diabásio (Silva *et al.*, 2005).

As formas de relevo da CAR são bem marcadas e pontiagudas, originárias de movimentos tectônicos e seguindo linhas de falhas. Estas formas tornam-se mais alternadas e arredondadas nas rochas do Supergrupo Minas, situadas em altitudes abaixo dos 900m. (MINAS GERAIS, 2013). A morfologia do relevo da Serra do Caraça consiste num vale de fundo relativamente plano e pouco ondulado. O mesmo é cortado por cursos de água formadores da bacia do Ribeirão Caraça, que apresenta nos limites da CAR desníveis abruptos que separam o fundo do vale das cristas circundantes, cujas altitudes chegam 2072m (Moreira & Pereira 2004).

A CAR é coberta por Afloramentos Rochosos que acompanham a formação quartzosa delineada pelo relevo escarpado, que ocorrem associados à Neossolos Litólicos Distróficos típicos (AR1 e AR) a norte, e a Neossolos Litólicos Psamíticos na região centro-sul (AR6 e AR9 - Shinzato & Carvalho Filho, 2005; Dos Santos, 2006). Os Neossolos Litólicos Distróficos típicos (RL) também ocorrem sem associações, principalmente, junto às bases das serras da região sul desta UC. Outra classe de solos mais presente no CAR são os Cambissolos Háplicos Tb distróficos (CXbd), que podem estar associados a outros tipos de Cambissolos e a Latossolos Vermelho Amarelos (LVAw), presentes no extremo oeste, e a Latossolos Vermelhos Distróficos (LVd) presentes no extremo norte. Por fim, associados ao hidromorfismo, ocorrem Neossolos Flúvicos (RUbd) ao norte junto ao vale do córrego do moinho e Gleissolos Háplicos (GXbd) na região central, junto ao vale do córrego da Cascatinha e ao sul, próximo ao córrego do Engenho (Shinzato & Carvalho Filho 2005).

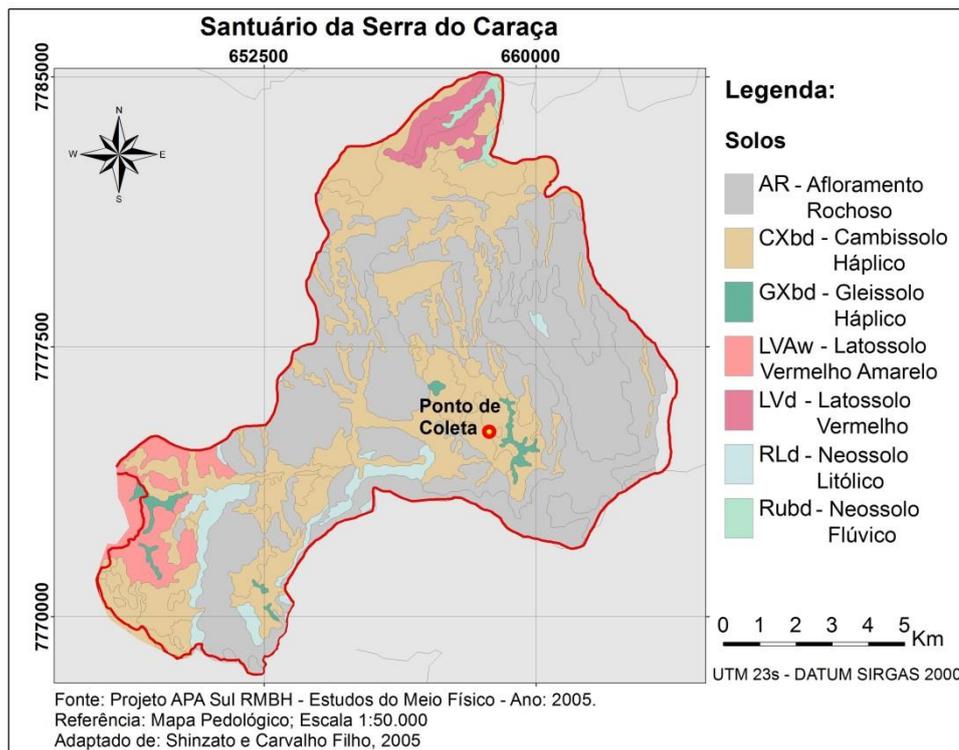


Figura 2.9 – Mapa de solos do Parque Nacional da Serra do Caraça – CAR. Modificado de Shinzato & Carvalho Filho (2005).

2.2.5 – Estação Ecológica de Arêdes

A Estação Ecológica de Arêdes (ARD) foi criada em 2010 pelo Decreto 45.397, que limitou a Unidade de Conservação em 11,58 km², inseridos no município de Itabirito – MG (MINAS GERAIS, 2010). Em 2013 os limites da UC foram alterados e a área passou a ter de 11,87 Km². Por fim, a Lei 21.555 de 22/12/2014 alterou novamente os limites da ARD, que passou ter os atuais 12,81 km² (MINAS GERAIS, 2014 – Figura 2.10).

Na ARD ocorrem treze diferentes unidades geológicas, associadas aos Supergrupos Rio das Velhas e Minas e a Depósitos Cenozóicos. Nesta UC, apenas o Grupo Nova Lima representa o Supergrupo Rio das Velhas, situando-se a sudeste e abrangendo 1,6 Km² (13,48% do total; CPRM, 2007, IEF 2016). No âmbito do Supergrupo Minas destacam-se na ARD os Grupos Piracicaba, Caraça e Itabira, representando mais de 85% da sua área total (IEF, 2016). Finalmente, os Depósitos Cenozóicos são formados por duas classes de sedimentos, as Coberturas Recentes, formadas por depósitos aluviais de argila, cascalhos fluviais em terraços e sedimentos lacustres e de enchimento de vales, e as Chapadas de Canga, que constituem depósitos elúvio-colúviais cenozóicos, constituindo capeamento limonítico contendo seixos, calhaus e matacões de formação ferrífera, predominando na porção sul desta UC (CODEMIG, 2005; CPRM, 2007; IEF, 2016).

Em relação à geomorfologia, a ARD inicia-se na borda leste e termina ao centro do Sinclinal Moeda, em um estreitamento delimitado ao oeste pelo Vale do Rio Paraopeba e ao leste pelo vale do

rio das Velhas, onde estão concentradas as maiores elevações da UC, sustentadas por quartzitos do Grupo Caraça. A zona compreendida pelas partes central e norte da UC apresenta altitudes comparativamente menores, associada a itabiritos do Grupo Itabira no terço sul e filitos do Grupo Piracicaba nos terços central e norte. Toda esta zona centro-norte se apresenta entalhada pela rede de drenagem do ribeirão Arêdes, no sentido leste-oeste, e do córrego Benevides, no sentido norte-sul (IEF, 2016).

Existem apenas duas classes de solos predominantes na ARD (Figura 2.10): Neossolos Litólicos distróficos típicos com horizonte A fraco/moderado, associado a afloramentos rochosos, ambos fase cerrado e caatinga hipoxerófila, relevo ondulado e forte ondulado e montanhoso (RLd4); e Cambissolos Háplicos distróficos típicos e lépticos com horizonte A moderado, textura média/argilosa, pedregosos/não pedregosos, associados a Neossolos Litólicos distróficos típicos com horizonte A moderado e a Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos típicos com horizonte A moderado, textura média/argilosa – CXbd21 (FEAM, 2010).

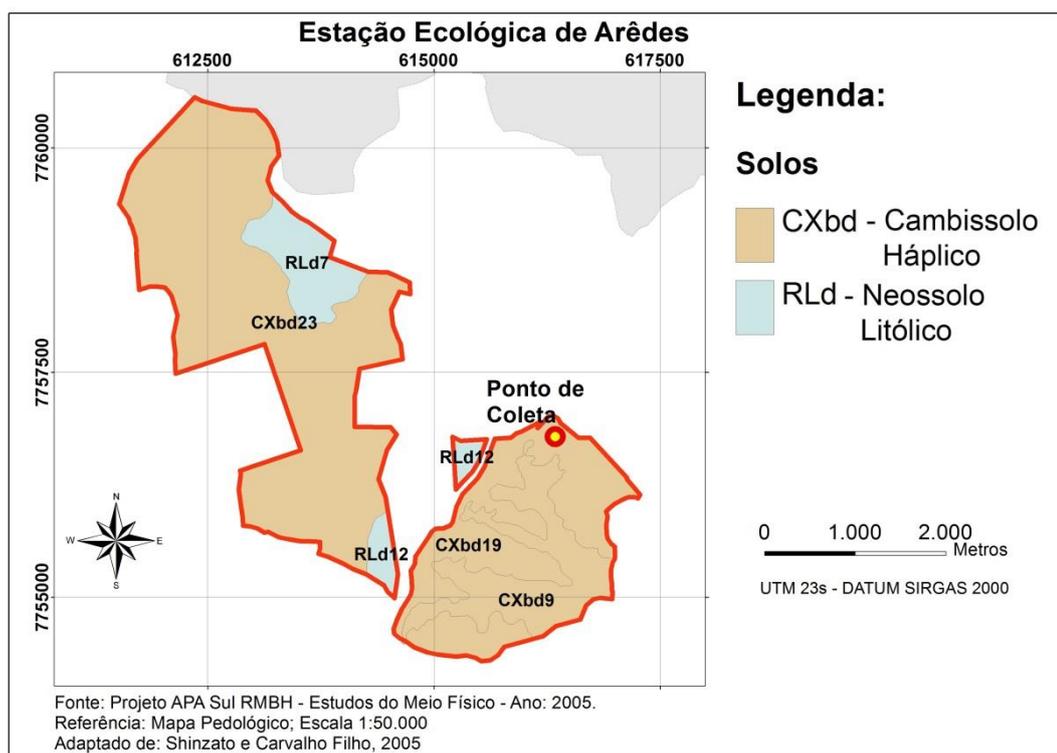


Figura 2.10 – Mapa de solos da Estação Ecológica de Arêdes – ARD. Modificado de Shinzato & Carvalho Filho (2005).

O norte da UC e quase toda região central são formados pelos Grupos Piracicaba, Caraça e Itabira, sendo comum a ocorrência de Neossolos Litólicos Distróficos típicos (RLd), associados à Cambissolos Háplicos, Afloramentos de Rocha ou Neossolos Regolíticos. O Grupo Itabira, presente na EEE de Arêdes, ocupa cotas inferiores àquelas do Grupo Piracicaba, que possui itabiritos e hematitas como base da composição litológica. Neste contexto, é comum a presença de solos com alto

teor de ferro, tendo horizonte A moderado a fraco como os Cambissolos Háplicos Tb Distróficos típicos (CXbd) e Cambissolos Háplicos Perféricos Petroplínticos (CXj), associados ou não aos Neossolos Litólicos. O Grupo Caraça, que ocupa grande parte do sudoeste da UC, é formado principalmente por conglomerados, quartzitos e filitos, que, em situações semelhantes no norte do QF, formam Cambissolos Háplicos Tb Distróficos típicos (CXbd) associados, ou não, a Neossolos Litólicos e Afloramentos Rochosos. A região sudeste da ARD é formada por rochas do Grupo Caraça, nas cotas mais elevadas do Sinclinal Moeda, onde as condições favorecem a formação de Cambissolos Háplicos Distróficos com caráter léptico ou lítico associados à Neossolos Litólicos, e rochas e rochas do Grupo Nova Lima na vertente leste do Sinclinal, onde a sequência pedológica do mapeamento da APA Sul RMBH indica a possibilidade de ocorrência de Cambissolos Háplicos Tb Distróficos típicos (CXbd), associados a Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico (Shinzato & Carvalho Filho, 2005).

2.2.6 – Floresta Estadual do Uaimii

A Floresta Estadual do Uaimii (UAI) foi criada em 2003, pelo Decreto Estadual S/N, de 21 de outubro de 2003 (MINAS GERAIS, 2013). Abrange 43,98 km² e situa-se no distrito de São Bartolomeu, pertencente ao município de Ouro Preto (Figura 2.11).

A UAI encontra-se no setor mais oriental da Serra de Ouro Fino-Conta História, ao longo da falha SE/NW do Fundão. Este setor é composto pelas rochas do Grupo Nova Lima, essencialmente por quartzo-micaxistos, com leitões, lentes e zonas de formações ferríferas metamorfoseadas, grauvacas e subgrauvacas, quartzito, conglomerado, rochas metavulcânicas, xistos e filitos grafitosos e outros metassedimentos (IEF, 2012). Sobrepondo-se ao Grupo Nova Lima, situa-se o Grupo Maquiné, formado por quartzitos, metaconglomerados, quartzosos e filitos (Dorr II *et al.*, 1957; Gonçalves, 2010). Afloramentos de rochas quartzíticas deste grupo dominam a paisagem nordeste da UAI, formando cristas com ampla ocorrência de candeia (IEF, 2012). Rochas dos Grupos Itabira e Caraça, que compõem pequenas áreas de canga laterítica e de metabasitos, anfíbolitos e talco xistos indivisos, situam-se nos limites NE da UAI, próximo ao rio das Velhas.

A geomorfologia da UAI é constituída, no extremo norte, por serras e escarpas estruturais em altitudes entre 1280-1830 m. Entre 1020-1450 m, encontram-se patamares estruturais, cristas alinhadas e ravinadas associadas às serras, em cotas mais altas, e aos morros e colinas convexas, em cotas mais baixas. Em cotas inferiores a 1020 m, situam-se os planaltos dissecados, que estão associados aos morros e colinas convexas e a encostas e vales encaixados. Estes, por sua vez, terminam em terraços e planícies fluviais em cotas inferiores a 950 m. No extremo sul, pode-se observar vales altimontanos associados às escarpas que dividem as bacias do córrego dos Macacos (Bacia do Rio das Velhas) e do rio Gualaxo do Norte (Bacia do Rio Doce; Carvalho 2006, 2005; IEF, 2012). Por fim, o declive médio da UAI é bem acentuado e varia entre 31-144 % (IEF, 2012).

Os solos da UAI são divididos em Cambissolos, Neossolos, Latossolos e Gleissolos (Carvalho, 2006; IEF 2012 – Figura 2.12). Estes solos são igualmente divididos segundo a sua abundância e as litologias que os originam após processos pedogenéticos. Os Cambissolos representam cerca de 75% dos solos da UAI e podem ser agrupados em: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico + Cambissolo Húmico Distrófico + Neossolo Litólico Distrófico relevo montanhoso/forte ondulado fase transição Campo Rupestre Arbustivo e floresta subtropical com candeia (CXbd1); Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico + Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico relevo forte ondulado/montanhoso fase floresta subtropical com candeia (CXbd2); e Cambissolo Háplico Tb Distrófico + Espodossolo Ferrocárbico Órtico típico fase campo cerrado subtropical, relevo suave ondulado (CXbd3). Os Cambissolos resultam da ação de processos pedogenéticos sobre as rochas do Grupo Nova Lima e ocorrem em locais com maior declive e cobertas por vegetação florestal nativa (Carvalho, 2006, Gonçalves, 2010; IEF 2012). Os Neossolos representam cerca de 14% dos solos da UAI e podem ser agrupados em: Neossolo Litólico Distrófico + Neossolo Quartzarênico Órtico + Espodossolo Ferrocárbico Órtico típico fase Campo Rupestre subtropical, relevo ondulado/suave ondulado (RLd1); Neossolo Litólico Distrófico + Neossolo Litólico Húmico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico fase Campo Rupestre aberto e arbustivo, relevo escarpado (RLd2); Neossolo Litólico Distrófico + Neossolo Litólico Húmico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico fase Floresta subtropical de candeia, relevo montanhoso (RLd3; IEF, 2012). Os Neossolos resultam da ação de processos pedogenéticos sobre as rochas do Grupo Maquiné, ocorrem nas regiões mais elevadas junto às cristas estruturais e serras, e dão suporte à vegetação de campo rupestre e matas de candeia (Gonçalves, 2010; IEF 2012). Os Latossolos representam cerca de 4% dos solos da UAI e podem ser agrupados em: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico relevo ondulado/forte ondulado fase floresta subtropical com candeia (LVAd; IEF 2012); e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico + Latossolo Vermelho-Amarelo Ácrico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico relevo suave – LVAd2 (Carvalho 2006). Os Latossolos resultam da ação de processos pedogenéticos sobre as rochas do Grupo Nova Lima e ocorrem em morros com menores inclinações e patamares (Gonçalves, 2010; IEF 2012). Os Gleissolos representam cerca de 1,7% dos solos da UAI e pode ser classificado como Gleissolo Háplico Distrófico típico relevo plano/suave ondulado + Neossolo Flúvico Tb Distrófico fase campo de várzea degradado (GXbd; IEF 2012); ou Gleissolo Melânico Distrófico típico relevo plano/suave ondulado (GMd; Carvalho, 2006). Os Gleissolos ocorrem em áreas hidromórficas e planas, associadas aos cursos de água (Carvalho, 2006, Gonçalves, 2010; IEF 2012).

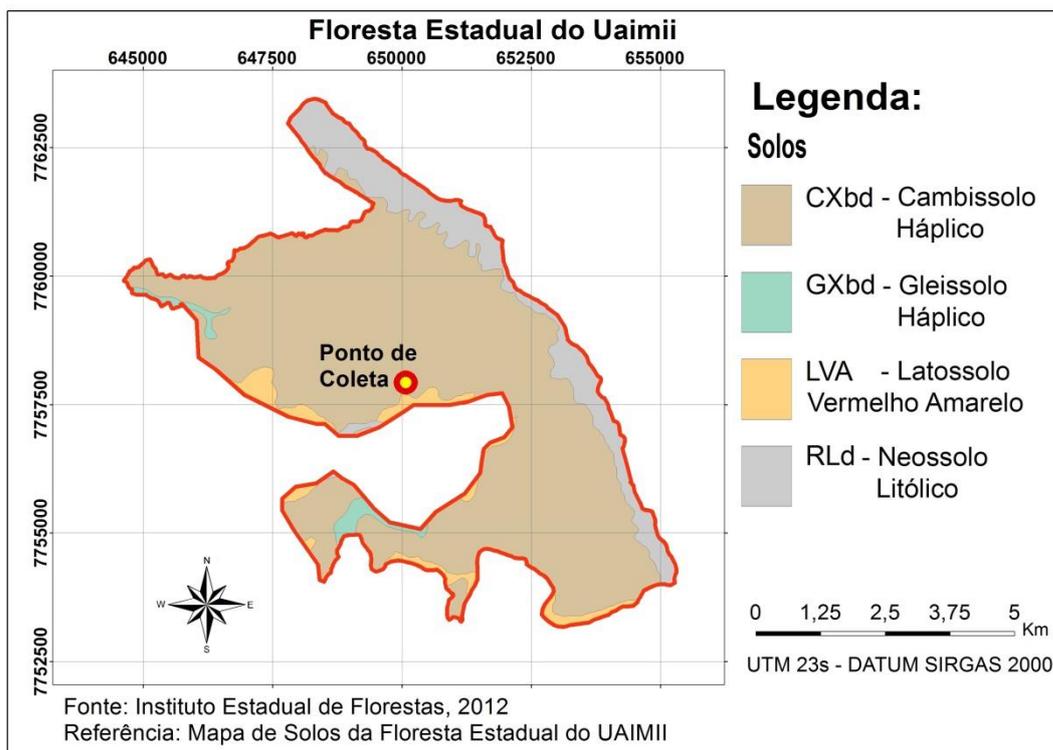


Figura 2.11 – Mapa de solos da Floresta Estadual do Uaimii – UAI. Modificado de IEF (2012).

2.2.7 – Parque Estadual do Itacolomi

O Parque Estadual do Itacolomi (ITA) foi criado pela lei estadual nº 4.495 em 14 de Junho de 1967 (MINAS GERAIS, 1967). O parque abrange uma área de 75,43 km² e situa-se nos municípios de Ouro Preto e Mariana, parte sudoeste do QF (Figura 2.12).

A litologia predominante nos limites do ITA é constituída pelas rochas dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas, sendo este formado pelo Grupo Piracicaba (filito grafitoso) e Grupo Sabará – (xisto, filito e quartzo ferruginoso), e pelo Grupo Itacolomi (metaconglomerados, metarenitos e quartzitos ferruginosos) (Glöckner, 1981, Ferreira e Lazarin 1993).

Segundo Ferreira e Lazarin (1993) e Andrade *et al.* (2012), no ITA ocorrem, basicamente, dois tipos de solo, os Neossolos Litólicos e os Latossolos, que refletem as características do material de origem e do relevo onde se formaram. Segundos estes autores, os Neossolos Litólicos predominam no Grupo Itacolomi, com sua textura arenosa, são essencialmente rasos e pouco férteis. Os Latossolos são encontrados no Supergrupo Minas, bem desenvolvidos e de textura argilosa. O Mapa de Solos de Minas Gerais (FEAM, 2010) indica apenas a presença de Cambissolos em cotas mais elevadas do ITA e de Latossolos em cotas inferiores, entretanto, a escala de mapeamento utilizada no estudo não permite uma classificação pedológica mais detalhada da área.

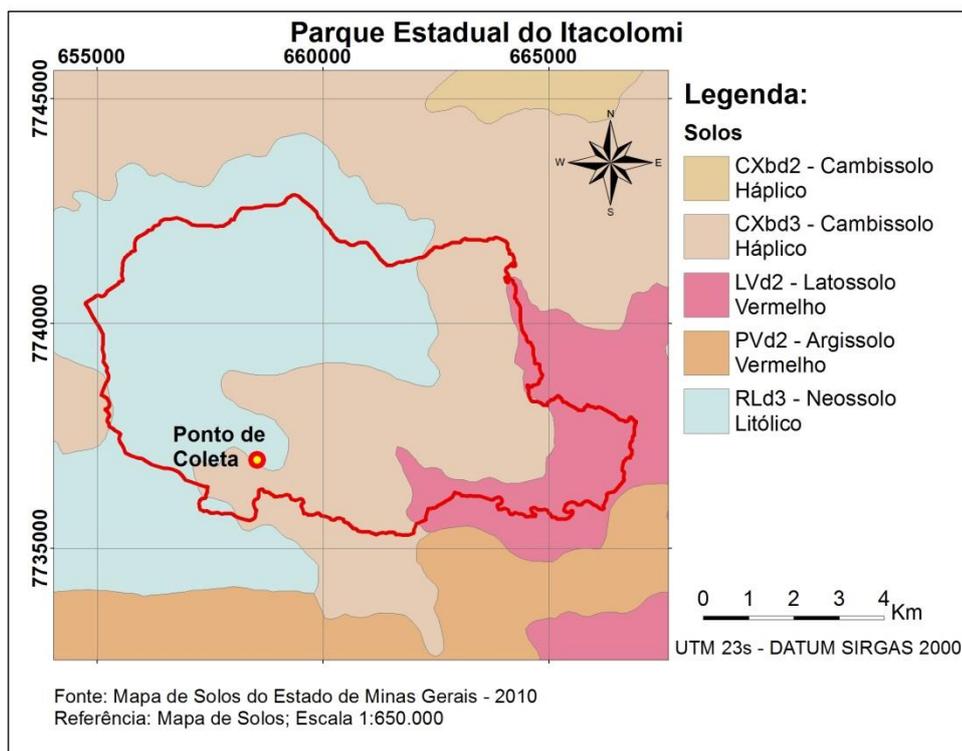


Figura 2.12 – Mapa de solos do Parque Estadual do Itacolomi (ITA). Modificado de FEAM (2010).

2.2.8 – Parque Estadual da Serra de Ouro Branco

O Parque Estadual Serra de Ouro Branco (OBR) foi criado pelo Decreto 44.180 de 21 de setembro de 2009 (MINAS GERAIS, 2009), abrange uma área de 75,2 km² e situa-se nos municípios de Ouro Branco e Ouro Preto (Figura 2.13). Localizado na borda limítrofe sul da Serra do Espinhaço, constitui, no sentido leste-oeste, um divisor natural das nascentes das bacias dos rios Doce e São Francisco.

As litologias aflorantes compreendem rochas do Complexo do Embasamento, Supergrupos Rio das Velhas (xistos e filitos) e Minas (filitos e itabiritos dos Grupos Piracicaba e Itabira, respectivamente), e do Grupo Itacolomi (quartzitos e metaconglomerados). Por fim, depósitos sedimentares quaternários e cangas ferríferas e lateritas (IEF, 2017).

Em relação à sua geomorfologia e pedologia, o OBR é constituído por sete unidades: planícies e terraços fluviais; tálus e leques aluviais de encostas; vales suspensos; colinas convexas; serras e cristas alinhadas e ravinadas; escarpas serranas; e patamares estruturais (IEF, 2017). Segundo o Plano de Manejo desta UC, as planícies e terraços fluviais ocorrem de forma restrita ao longo dos cursos de água de maior volume e situam-se na porção plana dos vales mais rebaixados, são áreas de acumulação de sedimentos detríticos quaternários transportados pelos rios. Os tálus e leques aluviais de encostas encontram-se associados aos sopés de escarpas de grandes dimensões que ocorrem na face sul da Serra de Ouro Branco (SOB) e são cobertos por Cambissolos Háplicos e Latossólicos. Os vales suspensos são áreas de campo higrófilo brejoso nas áreas hidromórficas, ou capões de matas, nas

partes mais bem drenadas. Concentram-se na porção central da SOB e possuem cobertura pedológica de Neossolos Quartzarênicos e Cambissolos Húmicos espódicos. As colinas convexas e os interflúvios, entalhados pela drenagem atual, encontram-se compreendidos no interior da vasta moldura quartzítica que forma a SOB. Nestas colinas predominam Cambissolos Húmicos e Háplicos associados a Neossolos Litólicos nas áreas de maior declive. As serras e as cristas compreendem os relevos mais dissecados, estão alinhadas segundo as direções E-W e NW-SE, e situam-se nas bordas ravinadas entre as escarpas quartzíticas/itabiríticas e as colinas. Predominam os mesmos tipos de solo das colinas convexas. As escarpas serranas constituem a moldura fundamental do relevo no OBR e são constituídas por “abas” de quartzitos e itabiritos. As escarpas em questão são constituídas por materiais quartzosos, resistentes ao intemperismo químico, e predominam os Neossolos Litólicos. Por fim, os patamares estruturais são áreas situadas sobre rochas quartzíticas e constituídas por uma espessa acumulação de materiais quartzosos. Estes teriam resultado do intemperismo das cristas circundantes e formado patamares pedregosos e interrompidos por cristas estruturais. Predominam Neossolos Quartzarênicos e Cambissolos Húmicos espódicos (IEF, 2017).

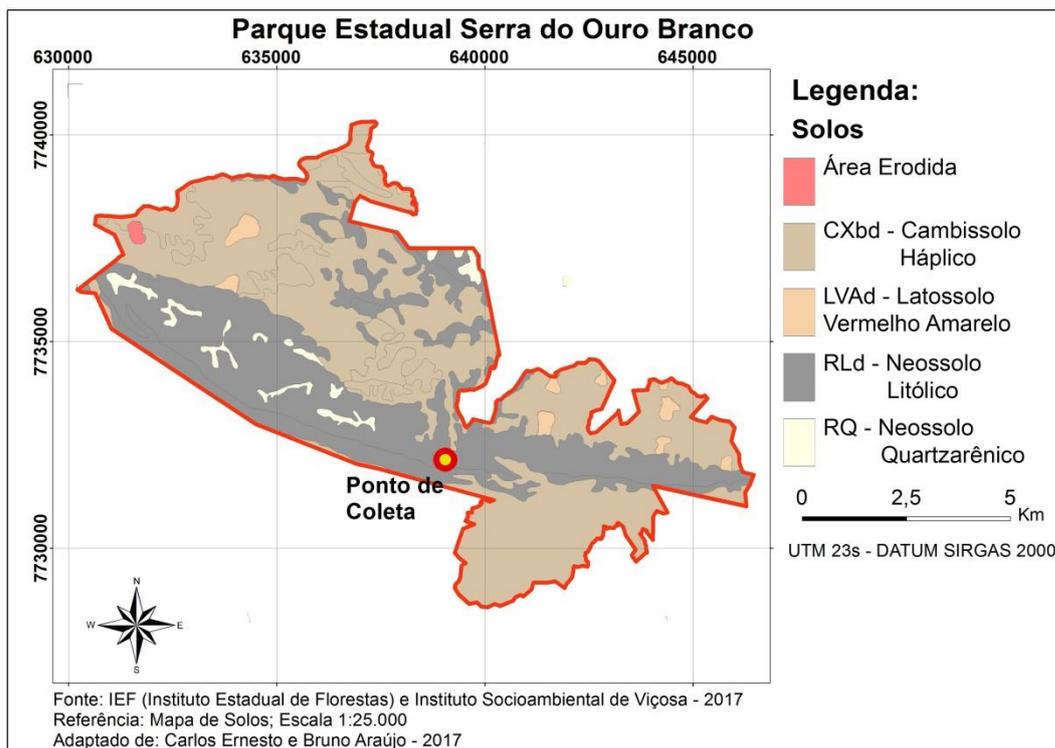


Figura 2.13 – Mapa de solos do Parque Estadual da Serra de Ouro Branco – OBR. Modificado de Shinzato & Carvalho Filho (2005).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A proposta metodológica dividiu-se em quatro etapas compostas por pacotes de trabalho específicos, como apresentado no fluxograma a seguir (Figura 3.1). A primeira etapa consistiu no planejamento executivo das demais, e nela, foram realizadas complementações na revisão bibliográfica cujo objetivo principal foi definir a malha amostral e detalhar os procedimentos necessários às análises laboratoriais. Nesta etapa também foi feita uma incursão prévia nas áreas de amostragem, foram iniciados os trâmites necessários à realização de pesquisa nas Unidades de Conservação (UC), e formalizadas parcerias para realização das análises.

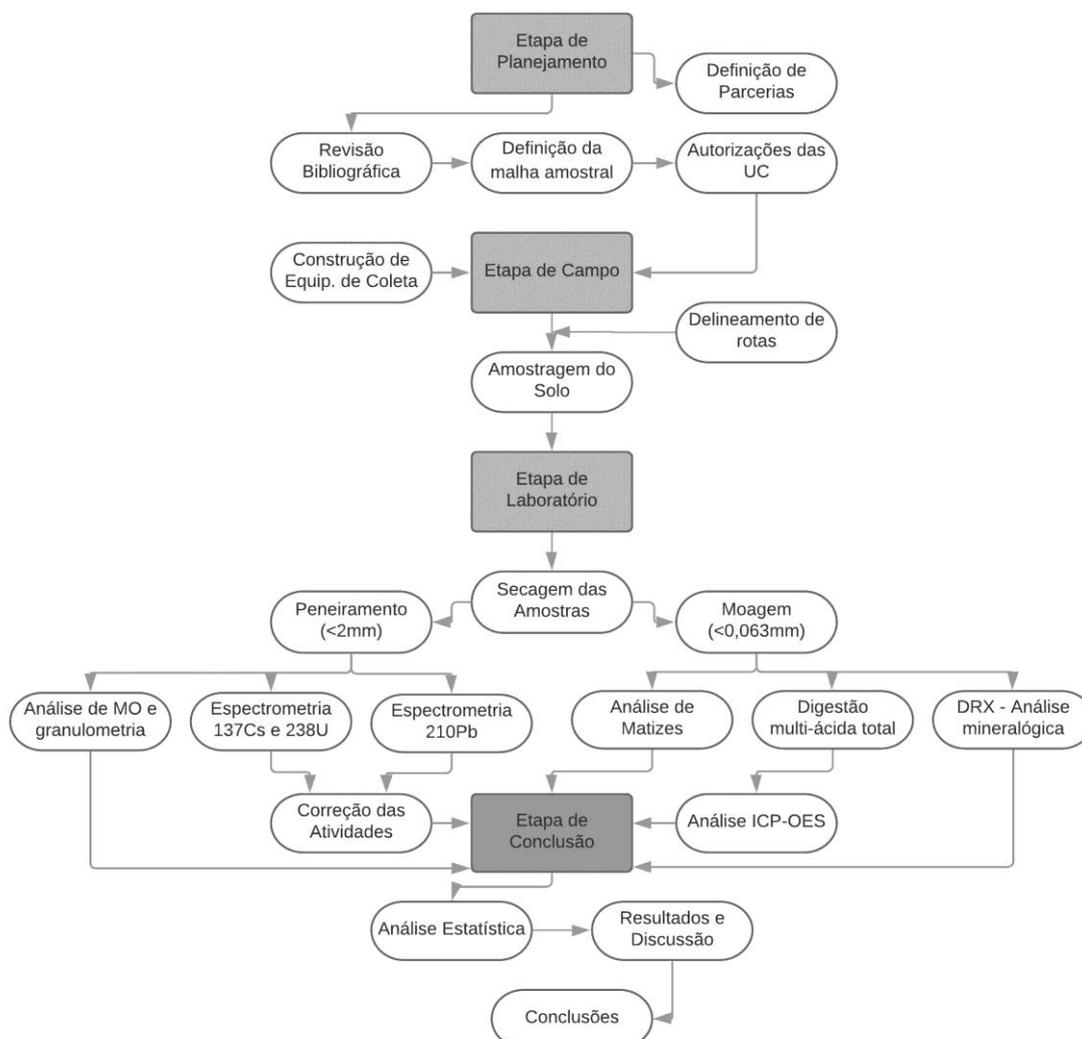


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia utilizada na realização do Inventário.

A segunda etapa do trabalho, a de campo, iniciou-se com a realização da primeira coleta de solo no Parque Nacional da Serra do Gandarela. Durante esta coleta, verificou-se a necessidade de revisão na logística de campo, além da construção de equipamentos mais eficientes. Assim, as novas rotas foram estabelecidas utilizando bases cartográficas regionais, como mapas de solos com escalas detalhadas, cartas do IBGE, imagens de satélite atuais, além do uso de softwares de navegação e confecção de rotas. Quanto aos equipamentos, foi confeccionado um novo trado e um raspador de solo, adequados à realização das coletas superficiais.

A terceira etapa iniciou-se no laboratório de Sedimentologia do DEGEO/UFOP, onde as amostras de solo foram secas, peneiradas a 2 mm e acondicionadas conforme necessidade de cada análise posterior. Ainda neste laboratório foram realizadas as análises visuais dos matizes. Também no DEGEO foram feitas as análises dos elementos químicos dos solos, no Laboratório de Geoquímica Analítica (LGqA), e, a análise de mineralogia, no Laboratório de Difração de Raios-X.

As análises de granulometria e dos teores de carbono orgânico do solo foram examinados pelo Laboratório de Análise de Solos (LAS) do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG. As atividades do ^{210}Pb foram verificadas no Laboratório de Espectrometria Nuclear (LEN) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), e, por fim, as atividades do ^{137}Cs e do ^{238}U foram analisadas pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Estadual de Londrina-PR.

A quarta e última etapa consistiu na realização de cálculos de atividades e de inventários isotópicos, cálculos estatísticos e interpretação dos resultados obtidos.

3.2 – DEFINIÇÃO DA MALHA AMOSTRAL

A malha amostral foi definida a partir de três principais indicadores: (1) presença de fragmentos de vegetação primária ou secundária em estágio avançado de regeneração, cujo solo tenha recebido pouca, ou nenhuma, antropização nos últimos 50 anos; (2) possibilidade de conservação do sítio amostral para seu uso em trabalhos futuros, que dependam da comparação dos dados deste inventário; (3) presença de classes de solos com algumas características semelhantes, neste caso, os cambissolos.

Para atender estes parâmetros, principalmente quanto aos estágios e possibilidades de conservação, optou-se por realizar os trabalhos no interior de Unidades de Conservação – UC (Tabela 3.1) distribuídas ao longo do Quadrilátero Ferrífero (QF). Por sua vez, a escolha das UC considerou a sua distribuição latitudinal e longitudinal no âmbito do QF, a fim de possibilitar uma amostragem significativa da distribuição dos radionuclídeos na área de estudo. Assim, as coletas de solo ocorreram em oito Unidades de Conservação (UC) distribuídas no interior do Quadrilátero Ferrífero (QF), como mostrado na Tabela 3.1. As UC estão distribuídas de forma representativa ao norte, sul, leste e oeste do QF.

Tabela 3.1 – Localização das áreas amostrais

Unidade de Conservação	Sigla do ponto de coleta	Altitude (m)	Coordenadas UTM. Zona 23K	
			Leste	Norte
Parque Estadual Serra do Rola Moça	RLM	1.070	599052,005	7781465,062
Estação Ecológica de Fechos	FCH	1.141	608492,438	7780400,798
Parque Nacional do Gandarela	GDR-1	1.248	641142,446	7784309,029
	GDR-2	1.403	635601,067	7777165,204
RPPN Santuário do Caraça	CAR	1.290	658702,120	7775145,819
Parque Estadual do Uaimii	UAI	1.204	650074,331	7757932,706
Estação Ecológica de Arêdes	ARD	1.425	616338,954	7756786,022
Parque Estadual do Itacolomi	ITA	1.183	658533,581	7736968,999
Parque Estadual Serra de Ouro Branco	OBR	1.316	639047,475	7732144,077

Estabelecida a malha amostral, foram iniciados os trâmites necessários à obtenção das licenças de pesquisa científica, junto às instituições e órgão responsáveis pela gestão das UC.

Após emissão das licenças, que ocorreu de forma paulatina, toda a base cartográfica foi incluída em um GPS de navegação modelo GARMIN Monterra®, por meio do software GPS Trackmaker Pro, iniciando assim, a etapa de campo.

3.3 – AMOSTRAGEM DO SOLO

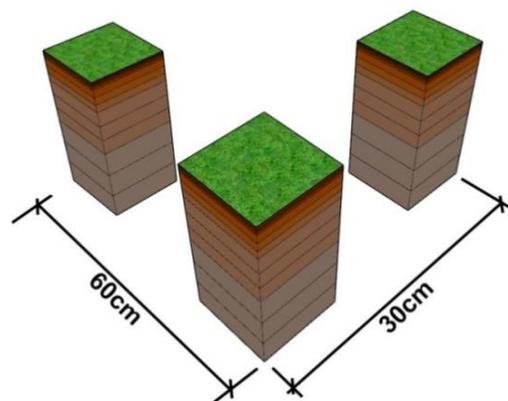
O método de coleta de solo utilizado denomina-se Amostragem em Incrementos de Profundidade, que permite quantificar a distribuição vertical dos radionuclídeos ao longo do perfil do solo (Andrello, 2004). Por sua vez, a profundidade de coleta ocorreu até 60 cm, pois, nesta faixa foram registradas as atividades de ^{137}Cs e $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ oriundos de *fallout*, conforme consta na maior parte da literatura consultada (Hutchison-Benson *et al.*, 1985; Forte, 1996; Huh *et al.*, 2004; Mabit *et al.*, 2008; Antunes *et al.*, 2010). Não foram consideradas faixas de profundidade de ocorrência do ^{238}U , pelo fato deste isótopo possuir formação exclusivamente geogênica, ocorrendo em todo o perfil do solo.

Em cada ponto de coleta foi delimitada uma área de 0,18 m², onde foram realizados três furos para coleta de amostras simples (Figura 3.2a). As amostras individuais de cada profundidade (Figura 3.2b) foram homogeneizadas, resultando em uma amostra composta por profundidade (Figura 3.3). Este método visou diminuir a variabilidade espacial em micro-escala das amostras. Foram amostradas as faixas de 0-3cm (0 a 1, 1 a 2 e 2 a 3cm); de 3-12cm (3 a 6, 6 a 9 e 9 a 12cm); 12-30cm (12 a 18, 18 a

24, 24 a 30cm); e 30-60cm (30 a 40, 40 a 50 e 50 a 60cm), sendo coletadas três amostras por faixa, distribuídas igualmente na profundidade. Assim, foram coletadas 12 amostras em cada ponto de coleta, resultando em um total de 108 amostras de solo.



(a)



(b)

Figura 3.2 – (a) Fotografia durante uma das coletas; (b) modelo de ponto amostral.

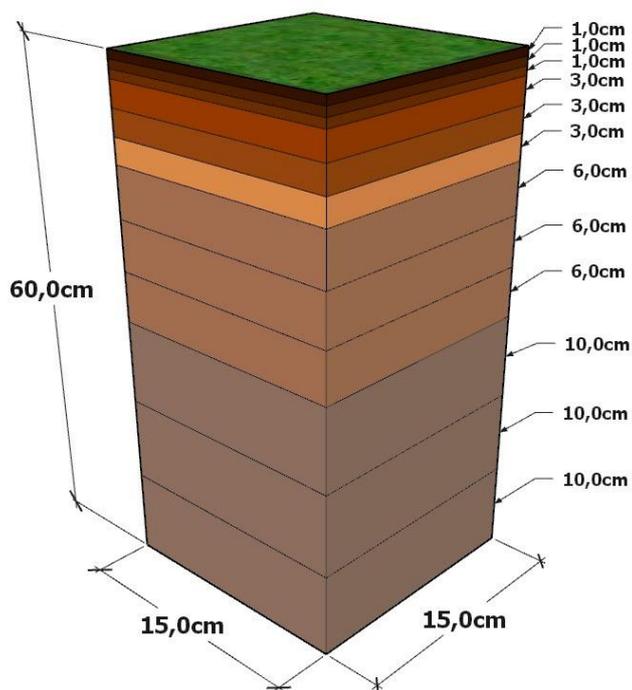


Figura 3.3 – Modelo do perfil de amostragem.

3.3.1 – Equipamentos de Coleta

A Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA (1996) sugere o uso de um instrumento denominado *Scraper Plate* ou Prato Raspador (Figura 3.4a), para realização da Amostragem em Incrementos de Profundidade (Andrello, 2004; Marestoni, 2007). O equipamento consiste em um gabarito metálico retangular de área interna conhecida e uma lâmina fixada em uma barra móvel que se movimenta horizontalmente sobre o gabarito e permite o ajuste vertical da lâmina, regulando a profundidade de coleta.

Para este trabalho foi confeccionado um equipamento semelhante, porém, com uma adaptação no sistema de regulagem da profundidade, coordenado por quatro reguladores de altura que permitem a movimentação vertical da lâmina e a alteração do ângulo de raspagem (Figura 3.4b). Nos dois modelos de Prato Raspador o gabarito define a área de amostragem a ser percorrida pela lâmina, responsável pela raspagem do solo.

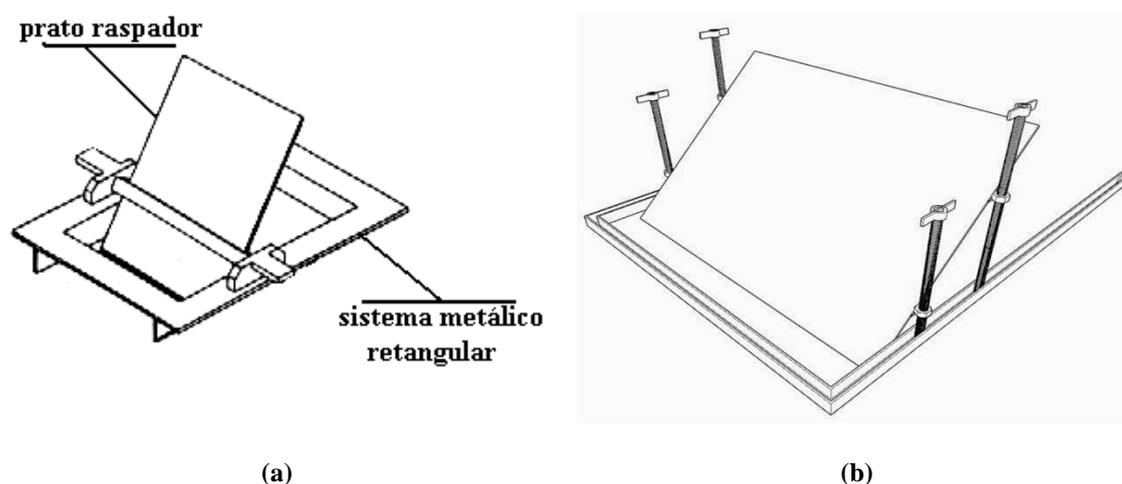


Figura 3.4 – (a) Prato raspador (Andrello 2004); (b) prato raspador adaptado para realização deste trabalho.

O Prato Raspador foi utilizado para a coleta de solo nas três primeiras camadas amostradas, que correspondem às camadas com 01 centímetro de espessura. (0-1 cm, 1-2 cm, 2-3 cm).

Para as amostras seguintes, com espessura de três centímetros, foi utilizado um trado confeccionado para realizar coletas superficiais. Este trado possui três lâminas levemente inclinadas em sua extremidade inferior que possibilitam a raspagem do solo e a coleta precisa de cada centímetro. O equipamento foi adaptado a partir do Cilindro Raspador (Figura 3.5a) desenvolvido por Andrello (2004), por tal motivo foi denominado Trado de Andrello, neste trabalho (Figura 3.5b).

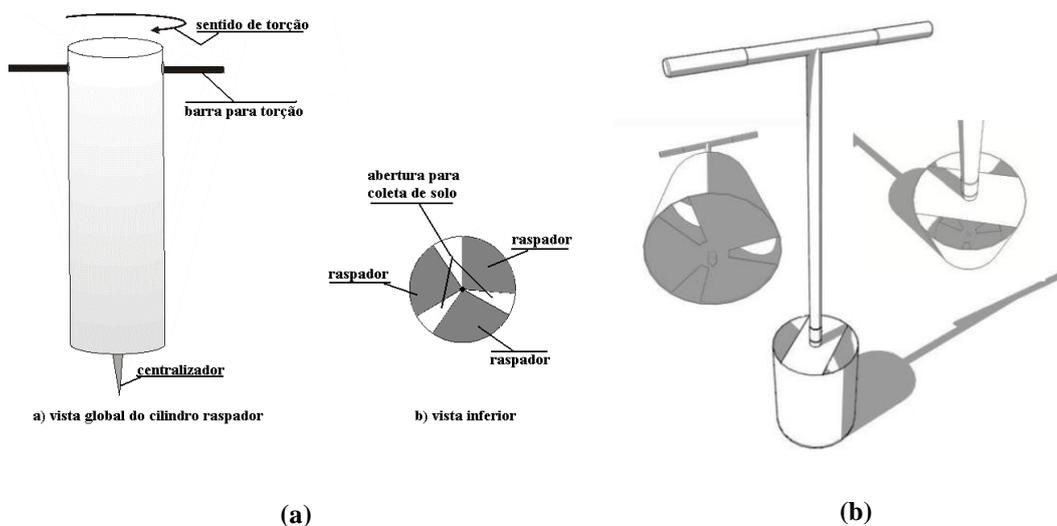


Figura 3.5 – (a) Cilindro raspador (Andrello, 2004); (b). detalhes do trado de Andrello confeccionado para realização deste trabalho.

As coletas utilizando o Trado de Andrello foram realizadas nos mesmos pontos de coleta das raspagens feitas com o Prato Raspador (Figura 3.6a e Figura 3.6b), dando sequência à *Amostragem em Incrementos de Profundidade* até 12 centímetros (3-6 cm, 6-9 cm, 9-12 cm).



Figura 3.6 – a) Finalização da coleta com o prato raspador; b) amostragem em incrementos de profundidade com o trado de Andrello após a utilização do prato raspador.

As amostras sequenciais com seis centímetros (12-18 cm, 18-24 cm, 24-30 cm), e com 10 cm (30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm), foram coletadas utilizando um trado pedológico comercial tipo Caneco (Figura 3.7a), fabricado pela empresa Sondaterra®. As amostragens foram realizadas nos mesmos furos deixados pelo Trado de Andrello, novamente, dando sequência à *Amostragem em Incrementos de Profundidade*. Durante as coletas ainda foram utilizadas pás, enxada, colheres, balanças, trenas, bacias, sacos plásticos, e outros materiais de apoio às coletas de campo (Figura 3.7b).



Figura 3.7 – (a) Esquema do trado caneco utilizado; (b) material utilizado em campo, incluindo o trado caneco.

3.3.2 – Preparação das Amostras em Campo

Em campo, o solo coletado passou por peneiras granulométricas de 12,5 mm e 6,3 mm, cujo intuito foi separar calhaus e parte dos cascalhos, além de resíduos orgânicos como raízes e tocos (Figura 3.8a). Após este peneiramento as amostras individuais similares foram homogeneizadas em recipientes plásticos previamente higienizados, gerando as amostras compostas, então ensacadas e identificadas (Figura 3.8b).



Figura 3.8 – (a) Peneiramento em campo; (b) conjunto de amostras identificadas após a coleta.

3.3.3 – Classificação dos Perfis do Solo

Embora a classificação dos solos seja finalizada após as análises químicas das amostras, essa etapa se inicia junto com a revisão bibliográfica e durante a realização dos trabalhos de campo, o que justifica sua descrição neste subitem.

O levantamento pedológico realizado durante a elaboração deste estudo se limitou à classificação dos perfis de solo amostrados durante as coletas, com intuito de confirmar a presença dos cambissolos. Desta forma a leitura dos horizontes ocorreu por meio da coleta de solo em furos feitos com auxílio de trados a uma profundidade máxima de 60 centímetros.

Em campo, a descrição dos perfis foi registrada em fichas para classificação morfológica dos solos, padrão IBGE (2007). Esse registro foi analisado juntamente com os resultados das análises de matizes, granulométricas e geoquímicas para então caracterizar os solos de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de solos (Santos, 2006).

3.4 – ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises laboratoriais foram realizadas conforme o detalhamento apresentado a seguir, que, na maioria das vezes, não trata-se de uma sequência de atividades.

3.4.1 – Preparação das Amostras em Laboratório

A temperatura de secagem das amostras foi fixada em 40°C, e o tempo variou em função da umidade presente em cada amostra, que, após manter constância em seu peso, foram levemente destorroadas, utilizando Almofariz e Pilão de cerâmica (Figura 3.9a). Com o solo seco, procedeu-se o peneiramento em malha 2 mm para retirada de cascalhos, resultando nas amostras de Terra Fina Seca ao Ar – TFSA. Feito isso, as amostras foram quarteadas (Figura 3.9b) sobre papel kraft e divididas em sub-amostras, então acondicionadas em sacos e potes plásticos identificados.



Figura 3.9 – (a) Destorroamento das amostras; b) quarteamento das amostras.

A TFSA, peneirada a 2 mm, foi enviada às análises de granulometria, do carbono orgânico total e de atividade dos radionuclídeos. Para análises químicas e de mineralogia essa TFSA foi pulverizada em um moinho de bolas planetário modelo PM-100-CM (Figura 3.10a), sob rotação de 300 rpm durante 45 minutos por amostra, resultando em um material coloidal com granulometria

inferior a 0,063 mm, equivalente a 230 Mesh ABNT (Figura 3.10b). Após o preparo de cada amostra o recipiente e as bolas foram higienizadas e submetidas à moagem de vidro lavado durante 5 minutos e sob a mesma rotação, evitando assim a contaminação de uma amostra com resíduos da anterior.

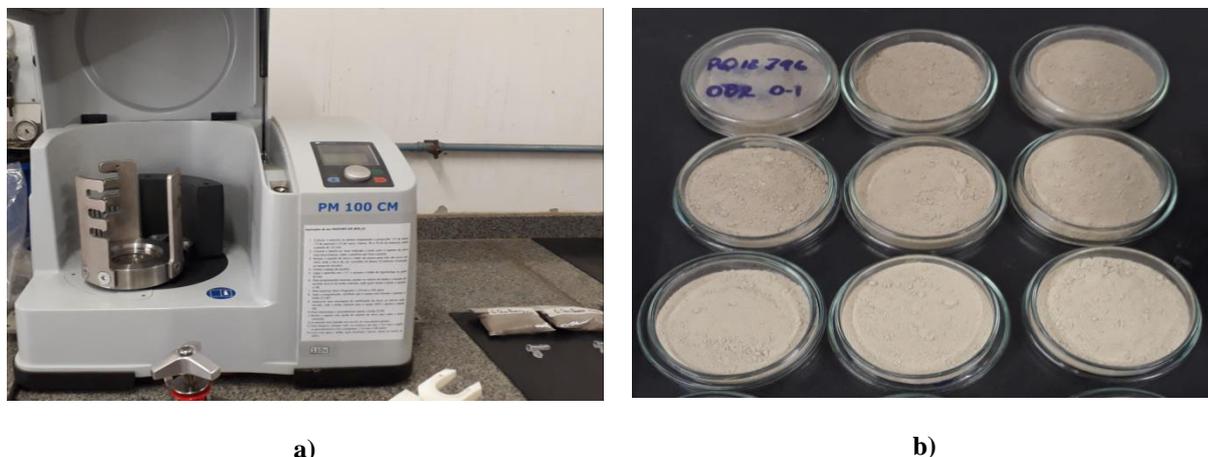


Figura 3.10 – a) Moinho de bolas planetário modelo PM-100-CM. LGqa/DEGEO; b) solo seco moído <0,063 mm.

3.4.2 – Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pelos métodos de peneiramento a seco e de Pipetagem (Embrapa, 1997). Foram individualizadas as frações de areia grossa (> 0,25 mm); areia fina (0,063 mm a 0,25 mm), silte e argila (<0,063mm) (Paisani, J.C. 2004).

3.4.3 – Análise de Carbono Orgânico Total (COT)

A quantificação do COT foi obtida por meio de sua oxidação em via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico, empregando-se como fonte de energia o calor despreendido do ácido sulfúrico. O excesso de dicromato, após a oxidação, foi titulado com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal (sal de Mohr), cujo volume gasto indicou o percentual de carbono orgânico da amostra (Embrapa, 1997).

3.4.4 – Análises Químicas

Para a determinação dos teores dos elementos trocáveis foi adotada a técnica da digestão química multi-ácida total, utilizando-se ácidos clorídrico, nítrico e fluorídrico. Para a digestão das amostras, 250 mg de TFSA moída (<0,063 mm) foram pesados e colocados em tubos de Teflon (Saville[®]), os quais receberam 1 ml de ácido nítrico (HNO₃ – 10 mol/L -1) e em seguida 3ml de ácido clorídrico (HCl – 10 mol/L -1). Os tubos permaneceram no interior de uma capela de exaustão de gases, sobre chapa aquecida a 110 °C (Figura 3.11a) até completa secagem do líquido. Então, foram adicionados 2 ml de ácido fluorídrico (HF p.a) nos tubos de Teflon que permaneceram na chapa aquecida até a completa secagem do líquido. Novamente, foram adicionados 2 ml de HF nos tubos que

passaram 30 horas sobre a chapa à 110 °C, desta vez, fechados. Após este período, os tubos foram resfriados e abertos, retornando à chapa aquecida até a completa secagem. O procedimento de secagem dos tubos abertos se repetiu por mais três vezes, com a sequência de adição de 2 ml de HNO₃, por duas vezes, e 2 ml de HCL mais uma vez. Por fim, adicionou-se 25 ml de HCL a 2 mol/L e, com os tubos fechados, a mistura permaneceu por mais duas horas na chapa aquecida.

Após resfriar, os extratos foram filtrados em membrana de 0,7 µm para retirada de resíduos de matéria orgânica (Figura 3.11b) e armazenados em recipientes descartáveis de polietileno. Além das 108 amostras de solo, foram feitas duas provas em branco e oito duplicatas com objetivo de aferir os resultados.

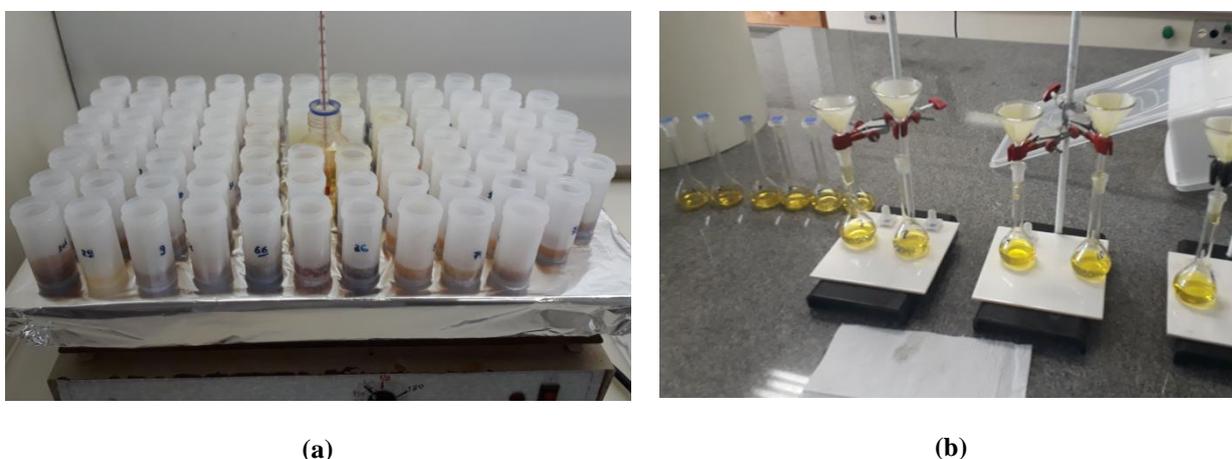


Figura 3.11 – (a) Frascos Savillex® em chapa aquecida; (b) filtragem após digestão total.

Os teores dos elementos nos extratos (Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sr, Ti, Th, V, Y, Zn e Zr) foram dosados por espectrofotometria de emissão ótica em plasma induzido ICP-OES (Spectro Cirrus CCD). Foi utilizado o material de referência GBW 7406, para avaliar a taxa de recuperação de cada elemento.

3.4.5 – Difratometria de Raio-X

Foram montadas as lâminas com uma fina camada de solo, para que as lamelas dos minerais planares permanecessem paralelas umas às outras, intensificando assim seus picos diagnósticos (Embrapa, 1997). Para montagem das lâminas foi utilizado 0,5g do material <0,063 mm, preparado no moinho de bolas.

Após a análise, realizada no equipamento Rigaku modelo D/Max-2B, com radiação CuK α ($\lambda=1,54 \text{ \AA}$), corrente de 40 mA e voltagem de 45 kV, foram identificados os minerais com apoio do software *X'Pert HighScore Report* e fichas de dados de difração do Centro Internacional de Dados de Difração JCPDS (2001).

3.4.6 – Análises de Matizes

As determinações dos Matizes (cores) foram feitas por comparação visual com os padrões da carta de Munsell (2009), utilizando as amostras de TFSA peneiradas (<0,063 mm), secas e umedecidas. Para que a variação do comprimento de onda da luz natural, em diferentes horários, não influenciasse o resultado ótico, optou-se por realizar as leituras durante o mesmo horário do dia, entre 10h e 11h, para todas as amostras.

3.4.7 – Análise de Radionuclídeos

A espectrometria de raios gama permite medir diretamente os emissores gama sem a necessidade de separação química dos elementos da amostra, portanto, uma técnica não destrutiva (Mubarakmand *et al.*, 1977; Andrello, 2004). Além disso, permite a identificação e a determinação da atividade de um radionuclídeo na amostra, neste caso, as amostras de TFSA, cujo tratamento consistiu apenas na secagem e separação granulométrica em peneiras de 2 mm.

Segundo Andrello (2004) os porta-amostras podem ter diferentes formas e composições químicas, podendo ser pequenos copos de náilon ou acrílico, cilindros de alumínio com tampas, sacos plásticos ou béqueres Marinelli. Sendo assim, para realização das análises de ^{137}Cs e ^{238}U , 200 gramas da TFSA foram acondicionados em porta-amostras plásticos de 350 ml (Figura 3.12a), com tampa dupla, onde as amostras permaneceram hermeticamente lacradas por, no mínimo 30 dias (equivalente a 7 semi-vidas de ^{222}Rn), antes de serem enviadas para análise. No caso do ^{210}Pb , a TFSA foi acondicionada em placas de petri confeccionadas em poliestireno com diâmetro de 50 mm, também lacradas (Figura 3.12b). Este procedimento permite que o ^{222}Rn (meia-vida = 3,8 dias) atinja o equilíbrio secular com o ^{226}Ra (meia-vida = 1622 anos), e foi obtido visando a realização das análises espectrométricas dos radionuclídeos da série do ^{238}U , uma vez que, o ^{226}Ra e sua progênie produzem 98,5% dos efeitos radiológicos das séries de ^{238}U , cuja contribuição é normalmente ignorada. Portanto, a referência deste radionuclídeo em série é frequentemente aferida pelo ^{226}Ra em equilíbrio (Parami, 2008; Sahoo *et al.*, 2010).

A espectrometria γ , realizada para verificar os picos de ^{137}Cs e ^{238}U , ocorreu em um detector de germânio vertical (HPGe) modelo GEM10185-P com diâmetro e comprimento do cristal igual a 43,5 mm, acoplado a um amplificador modelo 575A, fonte de alta tensão modelo 659, e placa multicanal (MCA) TrumpTM de 4096 canais com aplicativo MAESTROTM para Windows versão 3.2, uma blindagem da Ortec, modelo HPLBS1, com 10 cm de chumbo de baixo fundo recoberto internamente por 0,5 mm de estanho e 1,6 mm de cobre para diminuir a incidência no detector dos raios-X gerados no chumbo, sendo recoberta externamente por 9,5 mm de aço com baixa porcentagem de carbono. A atividade mínima detectável para o detector utilizado neste trabalho é de 0,09 Bq kg⁻¹.

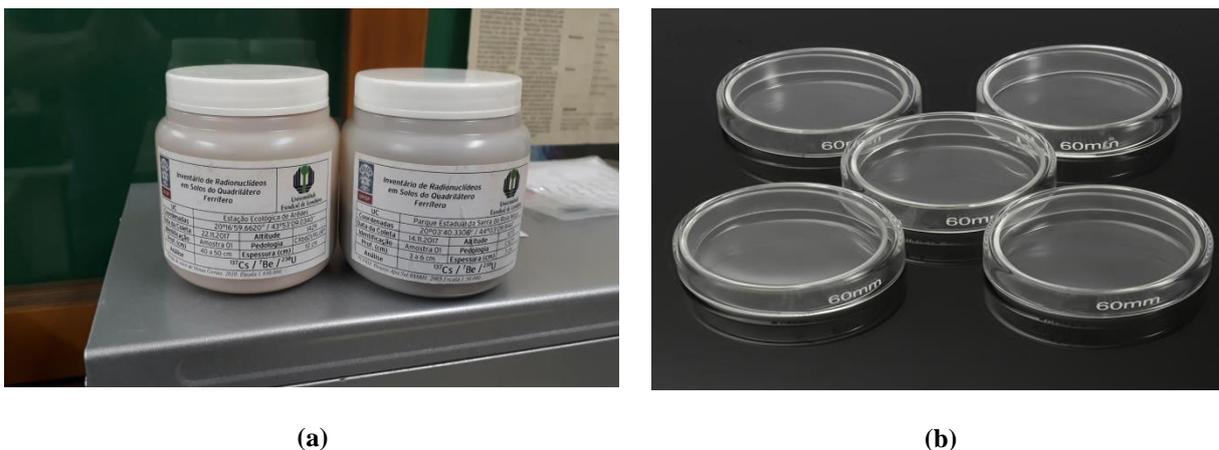


Figura 3.12 – (a) Porta-amostras utilizados para espectrometria de ^{137}Cs e ^{238}U , (b) porta-amostras utilizados para espectrometria de ^{210}Pb .

O sistema (Figura 3.13) funciona da seguinte forma: durante 24 horas o amplificador recebe os pulsos de voltagem tipo exponencial do pré-amplificador e produz pulsos de voltagem de saída que são contados no MCA, que mede a altura dos pulsos (em volts) proporcional à energia do raio gama. Um conversor analógico-digital no MCA converte os pulsos de voltagens em um número de canal, correspondendo a uma faixa estreita de voltagem. Conforme os pulsos de voltagens chegam ao MCA, este armazena em sua memória a distribuição das contagens dos pulsos, indicada pela intensidade destes pulsos. Esta distribuição arranjada em ordem crescente de altura dos pulsos (energia dos raios gama detectados) é chamada de espectro. Então, o software MAESTRO™ gerencia a aquisição no microcomputador através da placa MCA, de maneira que o espectro coletado possa ser armazenado e analisado posteriormente (Andrello, 2004).

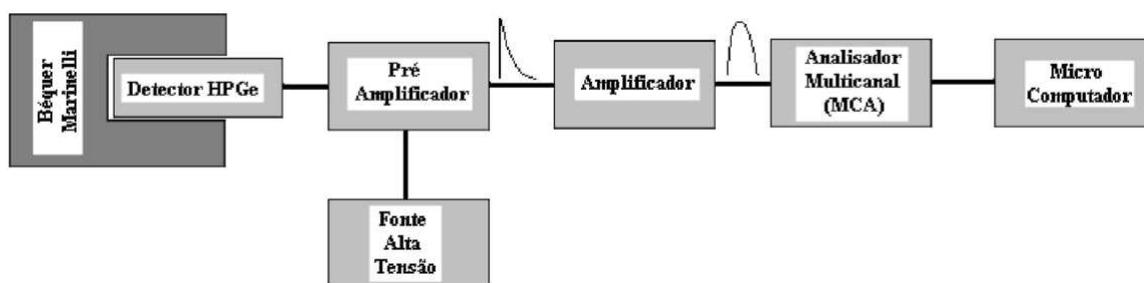


Figura 3.13 – Diagrama em blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama (Andrello, 2004).

Por fim, análise do espectro de ^{137}Cs e ^{238}U foi realizada no Software Genie 2000 – *Gamma Acquisition & Analysis*, versão 3.2.1 da Canberra Indústrias. Este software permite uma leitura gráfica dos picos de energia dos radionuclídeos e mostra informações como área de leitura, variação, meia-vida, entre outros (Figura 3.14). A quantificação da atividade de ^{238}U se deu por meio da leitura da área líquida dos picos de ^{226}Ra .

Para verificar se as amostras calibradas, utilizadas neste trabalho, reproduziriam o valor real da atividade das amostras analisadas, foi utilizada a amostra de solo certificada IAEA-327. O material apresentou uma atividade de ^{137}Cs de $14,3 \text{ Bq kg}^{-1}$, e, de ^{226}Ra de $34,1 \text{ Bq kg}^{-1}$, em dezembro de 2018 (Bojanowski *et al.*, 2001).

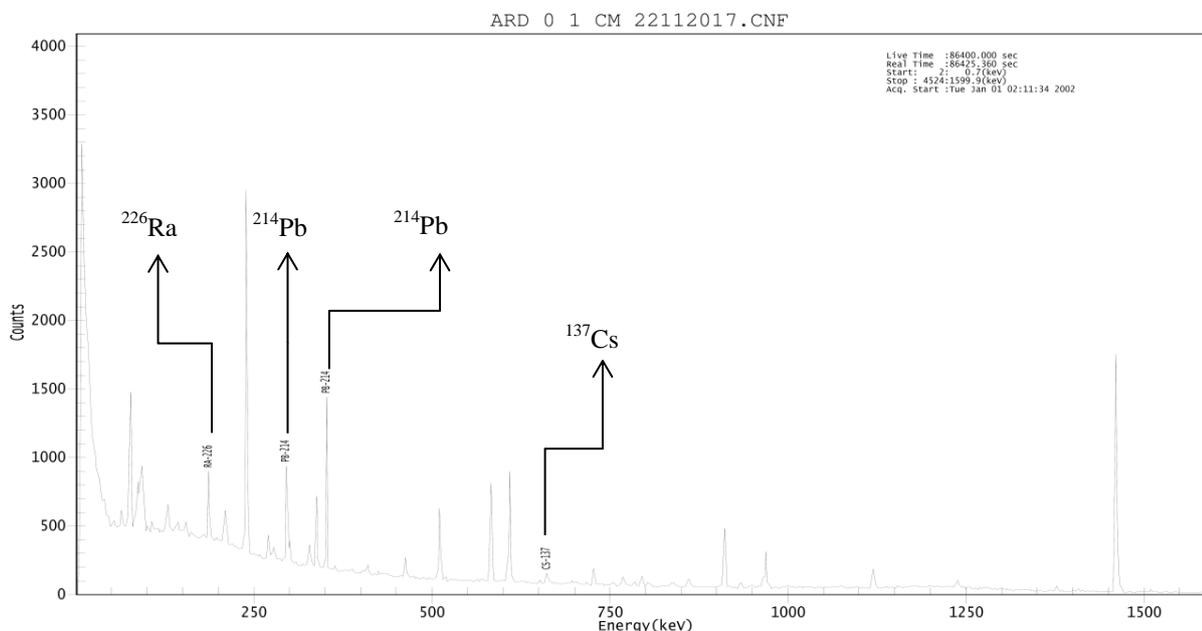


Figura 3.14 – Picos de contagem demonstrados no gráfico do software *Gamma Acquisition & Analysis*.

A espectrometria γ , realizada para verificar os picos de ^{210}Pb seguiu os mesmos princípios citados anteriormente, porém em um sistema de espectrometria gama Canberra, com detector para ultra baixa energia, GUL 0110, acoplado a microcomputador com Placa Multicanal de aquisição de espectros e com programa Genie 2K. Foi utilizado o material de referência IAEA-447 para verificar a curva de calibração do equipamento (Shakhashiro *et al.*, 2012).

3.5 – CÁLCULOS DE ATIVIDADE E INVENTÁRIO

Sendo o objetivo geral do trabalho, elaborar um inventário de referência com as concentrações de ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, e ^{238}U e comparar sua tendência de distribuição, a análise dos dados foi orientada pelo modelo de Distribuição de Perfil, cujas equações são referidas na literatura por diversos autores (Xinbao *et al.*, 1990; Walling & Quine, 1990; Forte, 1996; Baskaran & Naidu, 1995; Santos, 2001; Andrello, 2004; Mizugaki *et al.*, 2006; Marestoni, 2007).

3.5.1 – Determinação da Taxa Líquida de Contagem

A atividade de todos os radionuclídeos que emitem radiação- γ com uma energia característica pode ser relacionada com a área do pico de absorção total, o espectro formado nessa energia (Debertin & Helmer, 1988; Oliveira, 2006). Assim, a taxa líquida de contagem (N_n) sob o pico de interesse é

dada pela divisão da área líquida (A_L) pelo tempo t_n de aquisição da amostra (em segundos), como segue:

$$N_n = \frac{A_L}{t_n}$$

onde: N_n é a taxa líquida de contagem, expressa em contagens por segundo – cps; A_L é a área Líquida (dada pelo Software MAESTRO™); t_n tempo e aquisição da amostra, em segundos (Padrão – 86400 seg).

3.5.2 – Determinação da Concentração por Amostra (C_n)

Quando o espectro gama de uma amostra é obtido, é possível identificar as linhas gama e os radionuclídeos emissores destas presentes na amostra por meio da calibração em energia. Além de identificar quais radionuclídeos estão presentes no espectro, pode-se também determinar qual a concentração média de cada radionuclídeo na amostra (Andrello, 2004). Para se determinar a concentração, utiliza-se a seguinte equação:

$$C_n = \frac{N_n}{\varepsilon m_a P_\gamma}$$

onde: C_n é a concentração do radionuclídeo estudado, para a profundidade i , expresso em Bq kg^{-1} ; N_n é a taxa líquida de contagem, expressa em contagens por segundo – cps.; m_a é a massa da amostra em Kg; P_γ é a probabilidade¹ absoluta de transição do raio gama (γ) medido, expressa em porcentagem; ε é eficiência² de contagem para a energia do raio gama (γ) do radionuclídeo n .

3.5.3 – Determinação do Chumbo Precipitado ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)

Parte do ^{210}Pb total encontrado no solo superficial é formado *in situ* como produto do decaimento do ^{222}Rn , o chamado de ^{210}Pb suportado, que possui a mesma atividade do ^{226}Ra , devido ao equilíbrio secular entre o Ra e seu produto filho (Parami, 2008). A outra parte do ^{210}Pb total é chamada de ^{210}Pb em excesso, ou não suportado, e é fornecida para a superfície do solo à uma taxa constante por meio do *fallout* (Forte, 1996; Andrello, 2004). Assim, para obter o valor do ^{210}Pb em excesso, Baskaran & Naidu (1995) e Mizugaki *et al.* (2006) propuseram o uso da seguinte equação:

$$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{Total}} - ^{226}\text{Ra}$$

onde: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ é a atividade de chumbo precipitado por *fallout*, expresso em Bq kg^{-1} ; $^{210}\text{Pb}_{\text{Total}}$ é atividade de chumbo no solo (precipitado + geogênico), expresso em Bq kg^{-1} ; ^{226}Ra é atividade parente suportado do ^{210}Pb , expresso em Bq kg^{-1} .

3.5.4 – Determinação do Inventário de Referência (A_{ref})

¹ Diferente para cada radionuclídeo em estudo. $^{137}\text{Cs} = 0,85$; $^{210}\text{Pb} = 0,0425$, $^{238}\text{U} = 0,0001$. Não altera em função do Incremento.

² Dada a partir de uma amostra conhecida e certificada. Depende de cada radionuclídeo², da geometria do porta-amostras e do sistema utilizado. Não altera em função do Incremento.

A concentração dos radionuclídeos (^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U) em um determinado ponto de coleta, poderá ser calculada por meio da equação descrita a seguir, adaptada de Andrello (2004):

$$A_{ref} = \sum_{i=1}^z C_i \times p_i \times I_i$$

onde: A_{ref} é o inventário total do radionuclídeo estudado, para o ponto amostrado (Bq m^{-2}); C_i é a concentração do radionuclídeo estudado, para a profundidade i (Bq kg^{-1}); p_i é a densidade volumétrica para a profundidade i (kg m^{-3}); I_i é o incremento de amostragem para a profundidade i (m); z é a profundidade máxima de detecção para cada radionuclídeo amostrado (m).

Os valores utilizados para p_i , foram obtidos por meio da comparação da composição granulométrica (areia, silte e argila) dos solos das Unidades de Conservação (UC) com os solos referenciados por Marcolin & Klein (2011). A aferição dos valores foi realizada com os valores de densidade dos solos obtidos por Costa (2018), em seu estudo realizado na porção sudeste do quadrilátero ferrífero.

3.6 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A diversidade das variáveis analisadas, bem como dos objetivos propostos neste trabalho demandaram o uso de mais de um método estatístico para seu desenvolvimento. Estes métodos e o uso aplicado, encontram-se descritos a seguir.

3.6.1 – Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (r), também chamado de correlação linear ou r de Pearson, é um grau de relação entre duas variáveis quantitativas e exprime o grau de entre as variáveis. Este método foi utilizado durante a análise de elementos isolados, a fim de complementar a discussão, junto à análise multivariada.

3.6.2 – ANOVA e Teste de Tukey

Para avaliar se existe diferenças estatísticas significativas entre as atividades dos isótopos instáveis nas diferentes profundidades de coleta e entre as unidades de conservação foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA), e, o Teste de Tukey. As análises estatísticas e os gráficos foram feitos utilizando o software Statistica versão 10 (Stat Soft Inc.).

3.6.3 – Análise Multivariada (PCA e CATPCA)

Muitas vezes, os tratamentos estatísticos elementares não são suficientes para auxiliar na interpretação das complexas inter-relações existentes entre as variáveis ambientais. Diante disso, também foram realizadas análises multivariadas dos tipos Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Componentes Principais para Dados Categóricos (CATPCA).

O PCA é uma técnica de análise exploratória de dados multivariados que transforma um conjunto de variáveis correlacionadas num conjunto menor de variáveis independentes, simplificando os dados por meio da redução do número de variáveis necessárias para descrevê-los, que são combinações lineares das variáveis originais, designadas por componentes principais (Maroco, 2003; Moreira; 2007), que poderão ser utilizados como indicadores que resumem a informação disponível nas variáveis originais.

A CATPCA quantifica as variáveis categóricas utilizando o optimal scaling atribuindo quantificações numéricas às categorias de cada uma das variáveis qualitativas, possibilitando posteriormente uma análise das componentes principais para as variáveis assim transformadas (Meulman, 1992; Moreira; 2007). Os valores numéricos atribuídos a cada uma das classes das variáveis originais são obtidos, de um modo geral, por um procedimento iterativo designado por “método dos mínimos quadrados alternantes”, de tal modo que as quantificações numéricas possuam propriedades métricas (Maroco, 2003).

CAPÍTULO 4

CAMBISSOLOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

4.1 – DESCRIÇÃO DOS PERFIS

A seguir estão detalhados os nove perfis de cambissolos amostrados ao longo do Quadrilátero Ferrífero. No geral seus atributos são heterogêneos, exceto pela presença do horizonte B incipiente, que embora não siga um padrão em todos os perfis, atende as premissas descritas pela EMBRAPA (2006).

4.1.1 – Parque Estadual Serra de Ouro Branco (OBR)

Trata-se de um Cambissolo Háptico – (CX) desenvolvido sobre os quartzitos do Grupo Itacolomi (Figura 4.1). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. Fitofisionomia local de campo rupestre, em área com relevo suave-ondulado (3-8%), moderadamente drenado e sem erosão aparente.

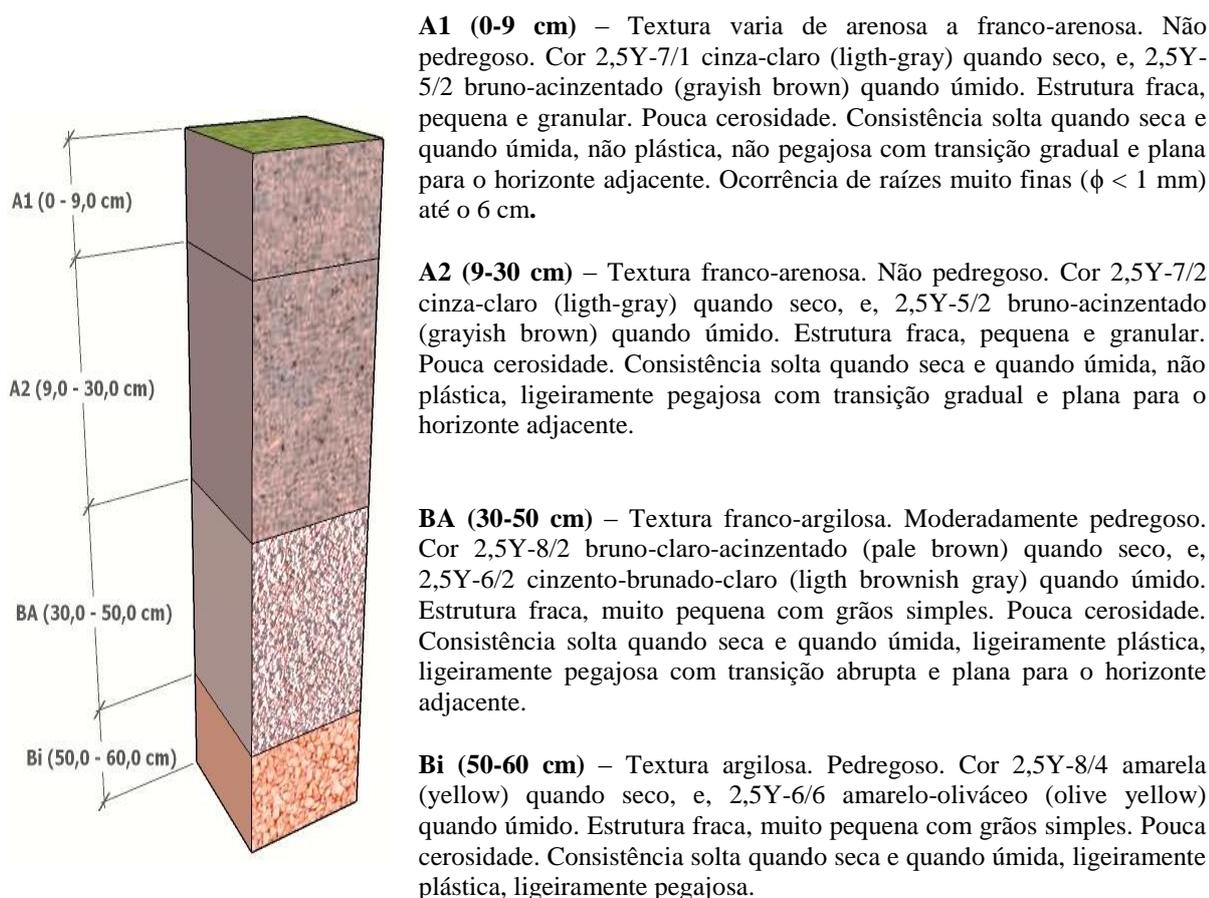
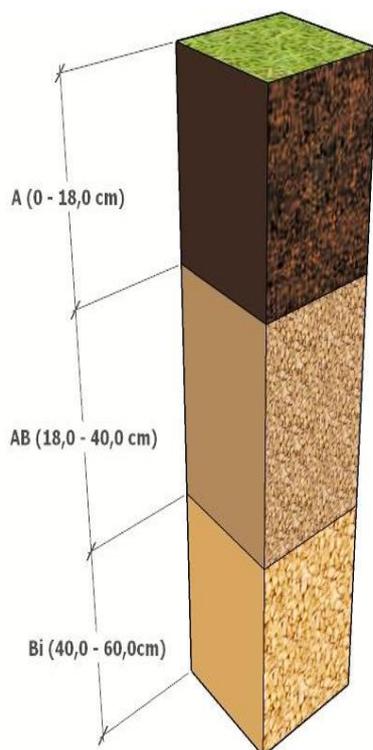


Figura 4.1 – Perfil do solo amostrado em OBR.

4.1.2 – RPPN Santuário do Caraça (CAR)

Trata-se de um Cambissolo Háplico – (CX) desenvolvido sobre os quartzitos da Formação Moeda (Grupo Caraça/Supergrupo Minas – Figura 4.2). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local é de cerrado/campo rupestre em área com relevo suave-ondulado (3-8%), moderadamente drenado e sem erosão aparente.



A (0-18 cm) – Textura arenosa. Não pedregoso. Cor 10YR-4/2 bruno-acinzentado-escuro (*dark grayish brown*) quando seco, e, 10YR-2/2 bruno-muito-escuro (*very dark brown*) quando úmido. Estrutura fraca, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência solta quando seca e quando úmida, não plástica, não pegajosa com transição gradual e plana para o horizonte adjacente. Ocorrência de raízes muito finas ($\phi < 1$ mm) até o 10 cm.

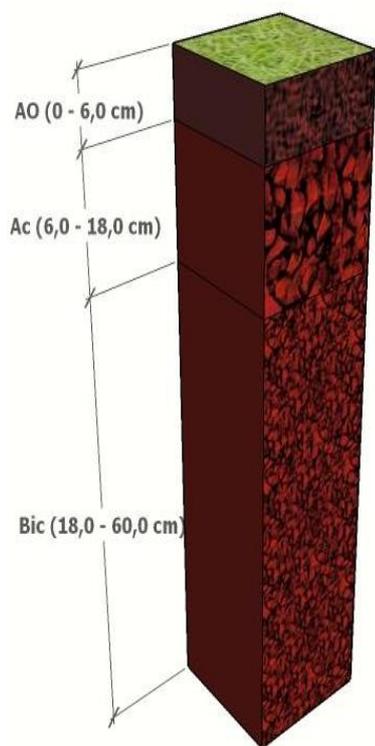
AB (18-40 cm) – Textura franco-arenosa. Moderadamente pedregoso. Cor 10YR-6/3 bruno-claro-acinzentado (*pale brown*) quando seco, e, 10YR-5/3 bruno (*brown*) quando úmido. Estrutura fraca, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência solta quando seca e quando úmida, não plástica, ligeiramente pegajosa com transição abrupta e plana para o horizonte adjacente.

Bi (40-60 cm) – Textura argilo-arenosa. Muito Pedregoso. Cor 2,5Y-7/6 amarela (*yellow*) quando seco, e, 2,5Y-6/6 amarelo-brunado-claro (*brownish yellow*) quando úmido. Estrutura fraca, muito pequena com grãos simples. Cerosidade comum e moderada. Consistência solta quando seca e quando úmida, ligeiramente plástica e pegajosa.

Figura 4.2 – Perfil do solo amostrado na RPPN Santuário do Caraça (CAR).

4.1.3 – Parque Estadual Serra do Rola Moça (RLM)

Trata-se de um Cambissolo Háplico – (CX) desenvolvido sobre, principalmente, formações ferríferas da Formação Gandarela (Grupo Itabira/Supergrupo Minas – Figura 4.3). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local Vegetação de floresta estacional semidecidual em relevo local ondulado (8-20%), fortemente drenado e sem erosão aparente.



AO (0-6 cm) – Textura franco-argilo-arenosa. Não pedregoso. Cor 2,5YR-3/4 bruno-avermelhado-escuro (dark reddish brown) quando seco, e, 2,5YR-2,5/3 bruno-avermelhado-escuro (dark reddish brown) quando úmido. Estrutura fraca, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e friável quando úmida, não plástica, não pegajosa com transição abrupta e ondulada para o horizonte adjacente.

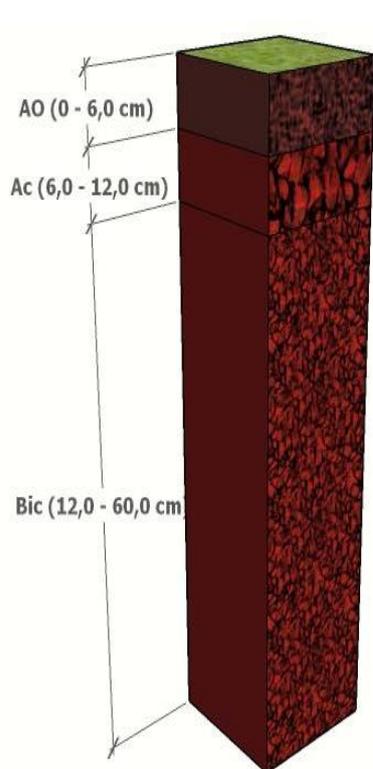
Ac (6-18 cm) – Textura franco-argilosa. Muito pedregoso. Cor 2,5YR-2,5/4 bruno-avermelhado-escuro (dark reddish brown) quando seco, e, 2,5YR-2,5/2 vermelho-muito-escuro-acinzentado (very dusky red) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e friável quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa com transição difusa e ondulada para o horizonte adjacente.

Bic (18-60 cm) – Textura argilosa. Pedregoso. Cor 2,5YR-2,5/4 bruno-avermelhado-escuro (dark reddish brown) quando seco, e, 2,5YR-2,5/2 vermelho-muito-escuro-acinzentado (very dusky red) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência ligeiramente dura quando seca e friável quando úmida, plástica, pegajosa. Ocorrência de raízes finas ($1 < \phi < 2$ mm) até o 50 cm.

Figura 4.3 – Modelo de Perfil de solo da amostra RLM.

4.1.4 – Parque Nacional da Serra do Gandarela – Amostra 01 (GDR-1)

Assim como mostrado no perfil anterior, o solo amostrado em GDR-1 trata-se um Cambissolo Háplico – (CX) desenvolvido sobre, principalmente, formações ferríferas da Formação Gandarela (Grupo Itabira/Supergrupo Minas – Figura 4.4). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local Vegetação de floresta estacional semidecidual em relevo local ondulado (8-20%), fortemente drenado e sem erosão aparente.



AO (0-6 cm) – Textura franco-arenosa. Moderadamente pedregoso. Cor 2,5YR-3/3 bruno-avermelhado-escuro (dark reddish brown) quando seco, e, 2,5YR-3/4 quando úmido. Estrutura fraca, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e friável quando úmida, não plástica, não pegajosa com transição abrupta e plana para o horizonte adjacente.

Ac (6-12 cm) – Textura franco-arenosa. Muito pedregoso (concreções tipo chumbo de caça – Carvalho Filho, 2008). Ver (Figura 4.5). Cor 2,5YR-3/4 bruno-avermelhado-escuro (dark reddish brown) quando seco, e, 2,5YR-2,5/2 vermelho muito escuro-acinzentado (very dusky red) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e friável quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa com transição difusa e ondulada para o horizonte adjacente.

Bic (12-60 cm) – Textura franco-argilo-arenosa. Muito pedregoso (concreções tipo chumbo de caça – Carvalho Filho, 2008). Cor 2,5YR-3/4 bruno-avermelhado-escuro (dark reddish brown) quando seco, e, 5YR-2,5/2 vermelho muito escuro-acinzentado (very dusky red) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência ligeiramente dura quando seca e friável quando úmida, plástica, pegajosa. Ocorrência de raízes finas ($1 < \phi < 2$ mm) até o 40 cm e intercalações de canga horizontalizada próximo as 60 cm de profundidade.

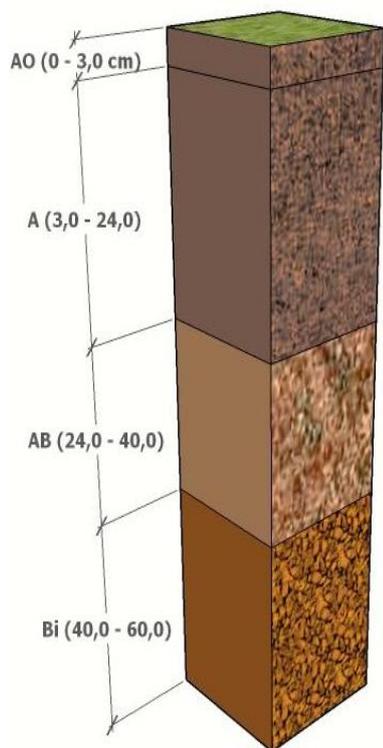
Figura 4.4 – Modelo de Perfil de solo da amostra GDR-1.



Figura 4.5 – Detalhe nas concreções em forma de chumbo de caça, em GDR-1.

4.1.5 – Estação Ecológica de Arêdes (ARD)

Trata-se de um Cambissolo Háplico – (CX) desenvolvido sobre quartzo-mica-clorita xisto da Unidade Córrego da Paina (Grupo Nova Lima/Supergrupo Rio das Velhas – Figura 4.6). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local é formada por campo rupestre em relevo local ondulado (8-20%), bem drenado e sem erosão aparente.



AO (0-3 cm) – Textura franco-argilosa. Não pedregoso. Cor 7,5YR-6/6 amarelo-avermelhado (*reddish yellow*) quando seco, e, 7,5YR-3/3 brunoscuro (*dark brown*) quando úmido. Estrutura fraca, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência solta quando seca e quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa com transição abrupta e plana para o horizonte adjacente.

A (3-24 cm) – Textura franco-argilosa. Não pedregoso. Cor 7,5YR-6/6 amarelo-avermelhado (*reddish yellow*) quando seco, e, 7,5YR-3/3 brunoscuro (*dark brown*) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e solta quando úmida, não plástica, ligeiramente pegajosa com transição gradual e plana para o horizonte adjacente. Ocorrência de raízes muito finas ($\phi < 1$ mm) até o 9 cm.

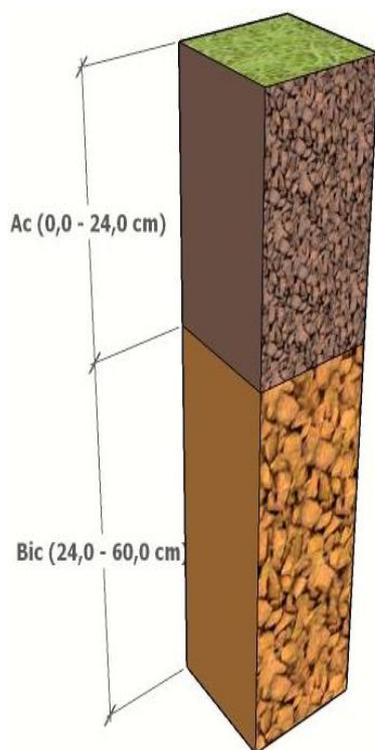
BA (24-40 cm) – Textura franco-argilosa. Não pedregoso. Cor 7,5YR-5/6 brunoforte (*strong brown*) quando seco, e, 7,5YR-4/4 brunoforte (*strong brown*) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca, e, quando úmida, não plástica, ligeiramente pegajosa com transição abrupta e plana para o horizonte adjacente.

Bi (40-60 cm) – Textura argilosa. Pedregoso. Cor 7,5YR-6/8 amarelo-avermelhado-forte (*reddish yellow*) quando seco, e, 7,5YR-4/4 brunoforte (*strong brown*) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena em blocos subangulares. Pouca cerosidade. Consistência dura quando seca e ligeiramente dura quando úmida, plástica e pegajosa.

Figura 4.6 – Modelo de Perfil de solo da amostra ARD.

4.1.6 – Estação Ecológica de Fechos (FCH)

Trata-se de um Cambissolo Háplico – (CX) desenvolvido sobre itabiritos da Formação Cauê (Grupo Itabira/Supergrupo Minas – Figura 4.7). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local é formada por vegetação de floresta estacional semidecidual em relevo local ondulado (8-20%), fortemente drenado e sem erosão aparente.



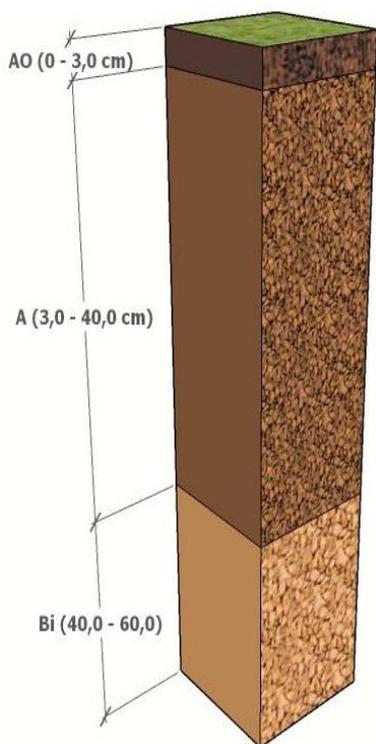
Ac (0-24 cm) – Textura franco-argiloso-arenosa. Pedregoso. Cor 7,5YR-4/4 bruno (*brown*) quando seco, e, 7,5YR-3/3 bruno escuro (*dark brown*) quando úmido. Estrutura moderada, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e friável quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa com transição difusa e plana para o horizonte adjacente.

Bic (24-60 cm) – Textura franco-argiloso-arenosa. Muito pedregoso. Cor 7,5YR-6/6 amarelo-avermelhado (*reddish yellow*) quando seco, e, 7,5YR-4/6 bruno escuro (*strong brown*) quando úmido. Estrutura moderada, pequena, blocos subangulares. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e friável quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa. Ocorrência de raízes finas ($1 < \phi < 2$ mm) até 30 cm.

Figura 4.7 – Modelo de perfil de solo da amostra FCH.

4.1.7 – Floresta Estadual do Uaimii (UAI)

Trata-se de um Cambissolo Háplico – (CX) desenvolvido sobre quartzo- biotita-clorita-xistos da Unidade Catarina Mendes (Grupo Nova Lima/Supergrupo Rio das Velhas – Figura 4.8). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local é formada por Vegetação de Floresta Estacional Semidecidual, com presença de mata de candeias, em relevo local ondulado (8-20%), fortemente drenado, sem erosão aparente.



AO (0-3 cm) – Textura franca. Não pedregoso. Cor 7,5YR-4/3 bruno (*brown*) quando seco, e, 7,5YR-2,5/2 bruno muito escuro (*very dark brown*) quando úmido. Estrutura fraca, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência solta quando seca e quando úmida, não plástica, não pegajosa com transição abrupta e plana para o horizonte adjacente.

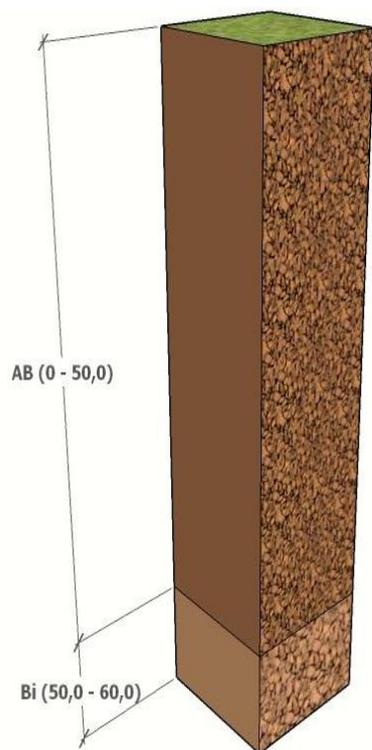
A (3-40 cm) – Textura franco-argilosa. Moderadamente pedregoso. Cor bruno 7,5YR-4/4 (*brown*) quando seco, e, 7,5YR-3/4 bruno-escuro (*dark brown*) quando úmido. Estrutura moderada, pequena, em blocos subangulares. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e friável quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa com transição gradual e plana para o horizonte adjacente. Ocorrência de raízes muito finas ($\phi < 1$ mm) até o 15 cm.

Bi (40-60 cm) – Textura argilosa. Moderadamente pedregoso. Cor 7,5YR-6/6 amarelo-avermelhado-forte (*reddish yellow*) quando seco, e, 7,5YR-5/6 bruno-forte (*strong brown*) quando úmido. Estrutura moderada, pequena, em blocos subangulares. Pouca cerosidade. Consistência ligeiramente dura quando seca e friável quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.

Figura 4.8 – Modelo de perfil de solo da amostra UAI.

4.1.8 – Parque Estadual do Itacolomi (ITA)

Trata-se de um Cambissolo Háptico – (CX) desenvolvido sobre quartzitos, filitos, metagrauvas e xisto cloríticos (Grupo Sabará/Supergrupo Minas – Figura 4.9). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local é formada por Vegetação de Floresta Estacional Semidecidual em relevo local ondulado (8-20%), fortemente drenado e sem erosão aparente.



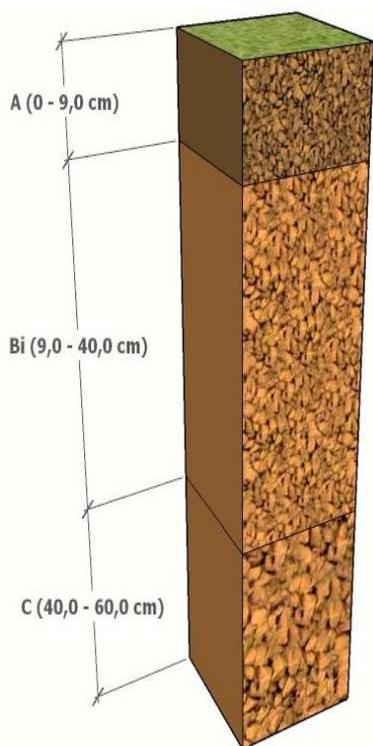
AB (0-50 cm) – Textura franco-argilo-arenosa. Pedregoso. Cor 7,5YR-5/6 cinza-bruno-forte (*strong brown*) quando seco, e, 7,5YR-3/4 bruno (*brown*) quando úmido. Estrutura moderada, pequena e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa com transição difusa e plana para o horizonte seguinte. Ocorrência de raízes finas ($1 < \phi < 2$ mm) até 15 cm.

Bi (50-60 cm) – Textura franco-argilo-arenosa. Muito pedregoso. Cor 7,5YR-6/6 amarelo-avermelhado (*reddish yellow*) quando seco, e, 7,5YR-4/4 bruno (*brown*) quando úmido. Estrutura moderada, pequena, bloco e granular. Pouca cerosidade. Consistência macia quando seca e quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.

Figura 4.9 – Modelo de Perfil de solo da amostra ITA.

4.1.9 – Parque Nacional da Serra do Gandarela – Amostra 02 (GDR-2)

Trata-se de um Cambissolo Háplico – (CX) desenvolvido, principalmente, sobre quartzitos e filitos da Formação Moeda (Grupo Caraça/Supergrupo Minas – Figura 4.10). Foi descrito um perfil com 60 cm de profundidade, amostrado com uso de trado. A fitofisionomia local é formada por vegetação de campo rupestre em relevo local suave-ondulado (3-8%), moderadamente drenado e sem erosão aparente.



A (0-9 cm) – Textura franco-argilosa. Muito pedregoso com concreções de quartzo. Cor 10YR-5/6 bruno-amarelado (*yellowish brown*) quando seco, e, 10YR-3/4 bruno-amarelado- escuro (*dark yellowish brown*) quando úmido. Estrutura moderada, muito pequena, laminar. Pouca cerosidade. Consistência dura quando seca e firme quando úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa com transição difusa e descontínua para o horizonte adjacente.

Bi (9-40 cm) – Textura argilo-arenosa. Muito pedregoso com concreções de quartzo. Cor 5YR-6/6 amarelo-avermelhado (*reddish yellow*) quando seco, e, 5YR-4/6 vermelho-amarelado (*wellowish red*) quando úmido. Mosqueamento abundante, grande e distinto com matizes que variam de 10R a 10YR (Figura 4.11a). Estrutura fraca, muito pequena com grãos simples. Pouca cerosidade. Consistência solta quando seca e quando úmida, não plástica, não pegajosa com transição abrupta e plana para o horizonte adjacente. Ocorrência de raízes muito finas ($\phi < 1$ mm) até 18 cm.

C (40-60 cm) – Textura Franco-arenosa. Extremamente pedregoso. Cor 5YR-5/8 vermelho-amarelado (*yellowish red*) quando seco e 5YR-4/6 vermelho-amarelado (*yellowish red*) quando úmido. Estrutura forte, grande, laminar (Figura 4.11b). Pouca cerosidade. Consistência muito dura quando seca e firme quando úmida, não plástica, não pegajosa.

Figura 4.10 – Modelo de Perfil de solo da amostra GDR-2.



(a)



(b)

Figura 4.11 – a) O detalhe indica o mosqueamento presente no horizonte Bi da amostra GDR-2, b) Saprólito com estrutura laminar retirado entre a profundidade de 50 a 60 cm da amostra GDR-2.

4.2 – GRANULOMETRIA

Na maioria dos casos, a granulometria dos solos amostrados é heterogênea quanto à sua distribuição ao longo dos 60 cm de perfil amostrado. De qualquer forma, existe uma predominância de solos arenosos, como pode ser verificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição granulométrica das amostras de solo

UC	Perfil	Profundidade (cm)	Classe de textura				Classificação (USDA)
			Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
OBR	A1	0-9	29,92	47,28	10,00	12,80	Franco arenoso
	A2	9-30	22,23	41,78	21,50	14,50	Franco arenoso
	BA	30-50	1,95	30,05	41,00	27,00	Franco argiloso
	Bi	50-60	2,20	23,80	42,00	32,00	Argiloso
CAR	A	0-18	75,33	4,67	4,67	15,67	Areia franca
	AB	18-40	77,00	3,67	7,00	12,00	Areia franca
	Bi	40-60	56,65	11,35	17,00	15,00	Argilo arenoso
RLM	AO	0-6	17,65	26,85	28,00	26,00	Franco argilo arenoso
	Ac	6-18	18,37	15,63	38,50	26,00	Franco argiloso
	Bic	18-60	16,40	23,20	39,20	21,20	Argiloso
GDR-1	AO	0-6	22,80	45,70	16,00	12,67	Franco arenoso
	Ac	6-12	26,80	44,20	18,67	17,33	Franco arenoso
	Bic	12/60	27,23	37,43	24,33	11,00	Franco argilo arenoso
ARD	AO	0-3	3,50	21,17	38,67	36,67	Franco argiloso
	A	3-24	4,64	22,56	41,20	31,60	Franco argiloso
	AB	24-40	21,30	18,70	37,00	23,00	Franco argiloso
	Bi	40-60	7,95	19,05	56,00	17,00	Argiloso
FCH	Ac	0-24	25,90	34,10	28,25	11,75	Franco argilo arenoso
	Bic	24-60	36,38	24,13	28,50	11,00	Franco argilo arenoso
UAI	AO	0-3	1,23	48,10	20,67	30,00	Franco
	A	3-40	1,47	33,39	36,33	26,33	Franco argilosa
	Bi	40-60	2,20	24,80	42,00	31,00	Argilosa
ITA	A	0-50	10,88	39,48	26,80	22,20	Franco argilo arenoso
	Bi	50-60	10,10	43,90	24,00	22,00	Franco argilo arenoso
GDR-2	A	0-9	14,84	23,16	32,80	29,20	Franco argiloso
	Bi	9-40	37,84	16,56	30,40	15,20	Argilo arenoso
	C	40-60	37,20	34,80	19,00	9,00	Franco arenosa

FCH e ITA apresentaram granulometrias mais homogêneas e semelhantes entre as amostras coletadas, sendo os solos destas UC classificados como Franco-Argilo-Arenosos em todo o perfil analisado. CAR também apresentou uma grande homogeneidade granulométrica no perfil e registrou os maiores teores de areia dentro dos primeiros 40 cm, assim como GRD-1. As amostras coletadas em RLM, ARD e UAI apresentaram os valores mais significativos de argilas, com exceção no primeiro centímetro de UAI. Em OBR foi clara a mudança textural do solo, de arenoso para argiloso, a partir da

metade do perfil analisado. Este padrão se inverteu em GDR-2, onde ocorreram maiores teores de argilas nas amostras superficiais e maiores proporções de areia nas amostras do fundo do perfil.

A PCA elaborado a partir dos dados de granulometria mostra uma clara separação de algumas unidades (Figura 4.12 e Figura 4.13).

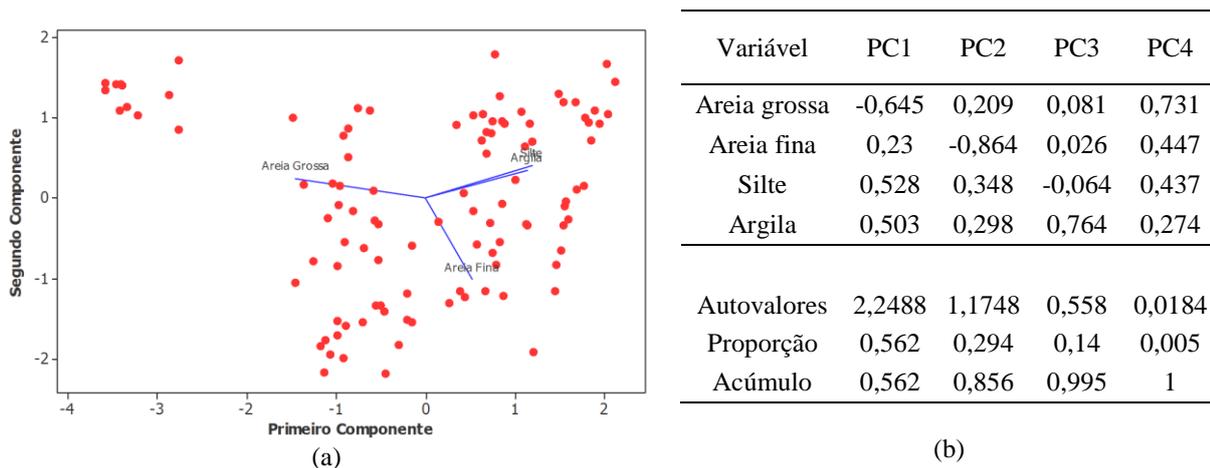


Figura 4.12 – (a) Gráfico biplot e (b) resultados da PCA para as variáveis de granulometria.

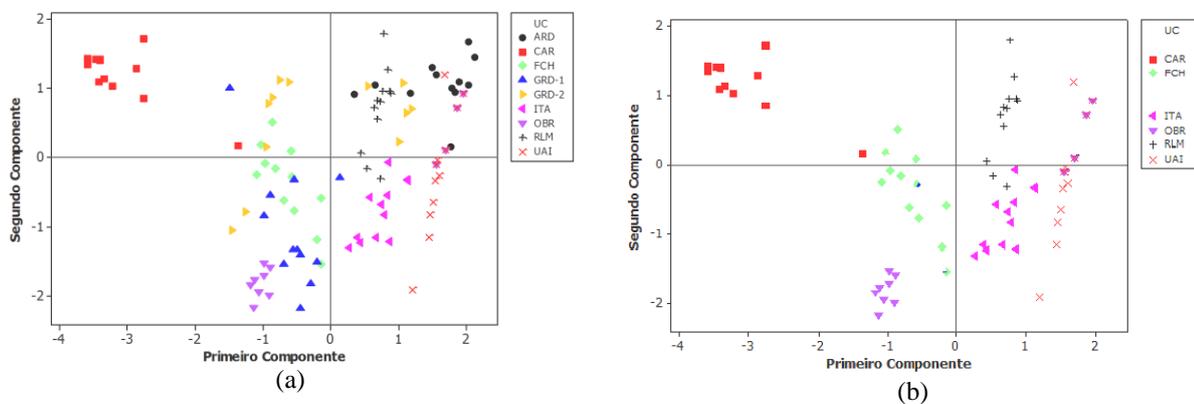


Figura 4.13 – Gráficos score plot da PCA para as variáveis de granulometria. a) com todas as unidades, b) sem as unidades ARD, GRD1 e GRD2.

As diferenças em relação à granulometria dos perfis são confirmadas pelas análises ANOVA (Tabela 4.2). Claramente, as amostras de CAR se separam das demais por seus elevados percentuais de areia grossa e baixos de areia fina e silte, ARD por seu alto percentual de silte e argila e UAI por seu baixo percentual de areia grossa.

Tabela 4.2 – Resultados das ANOVAs para as variáveis de granulometria (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si)

Unidades	Percentuais médios			
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
ARD	7,683 ^{ef}	20,983 ^b	42,333 ^a	29,000 ^a
CAR	72,633 ^a	5,533 ^c	7,500 ^d	14,333 ^{de}
FCH	29,392 ^b	30,775 ^{ab}	28,333 ^{bc}	11,500 ^e
GRD-1	23,683 ^{bc}	37,983 ^a	20,833 ^c	13,667 ^{de}
GDR-2	28,150 ^b	22,350 ^b	29,500 ^{bc}	20,000 ^{bcd}
ITA	10,817 ^{def}	39,850 ^a	26,667 ^c	22,667 ^{abc}
OBR	20,383 ^{bcd}	40,617 ^a	21,667 ^c	17,333 ^{cde}
RLM	17,308 ^{cde}	22,525 ^b	36,167 ^{ab}	24,000 ^{abc}
UAI	1,533 ^f	35,633 ^a	36,167 ^{ab}	26,667 ^{ab}

4.3 – MINERALOGIA

Na mineralogia das amostras, apesar do predomínio do quartzo, houve uma variação em função da localização das litologias das quais o solo se derivou e, conseqüentemente, da profundidade de coleta (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Composição mineralógica das amostras de solo

(continua)

UC	Litologia	Prof. (cm)	Composição mineral				Sigla	
OBR	Quartzitos	0-60	Quartzo	Muscovita	Caulinita	Gibbsita	QMCG	
		0-40					QG	
CAR	Quartzitos	40	Quartzo	Gibbsita	Sepiolita		QGS	
		50-60				Caulinita	QGSC	
RLM	Formações ferríferas	0-1	Quartzo	Gibbsita	Hematita	Muscovita	Caulinita	QGHMC
		1-60						
GDR-1	Formações ferríferas	0-60	Quartzo	Gibbsita	Hematita		QGH	
ARD	Quartzo-mica-clorita xistos	0-60	Quartzo	Muscovita	Caulinita	Gibbsita	QMCG	
FCH	Itabiritos	0-6					QHGo	
		6-9	Quartzo	Hematita	Goethita	Caulinita	QHGoC	
		9-60					QHGo	

Tabela 4.3 – Composição mineralógica das amostras de solo

(conclusão)

UC	Litologia	Prof. (cm)	Composição mineral				Sigla	
UAI	Quartzo-biotita-clorita-xisto	0-1	Quartzo	Muscovita	Caulinita	QMC		
		1-2				Microclínio	QMCMi	
		2-9					QMC	
		9-12				Microclínio	QMCMi	
		12-30					QMC	
		30-40				Microclínio	QMCMi	
		40-50					QMC	
		50-60				Microclínio	Biotita	QMCMiB
ITA	Quartzito, filito, megrauvaca e xisto clorítico	0-9	Quartzo	Muscovita	Caulinita	Gibbsita	QMCG	
		9-12					Talco	QMCGT
		12-18					Hematita	QGHMC
		18-24						QMCG
		30-50					Hematita	QGHMC
		50-60						QMCG
GDR-2	Sericita/muscovita-quartzo e quartzo-sericita/muscovita xistos	0-60	Quartzo	Muscovita	Caulinita	Gibbsita	QMCG	

Dentre as fases minerais, foram identificados quartzo (SiO_2), muscovita $[\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2]$, caulinita $[\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4]$, microclínio $[\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)]$, sepiolita $[\text{Mg}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$, biotita $[\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2]$, talco $[\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$, hematita (Fe_2O_3), gibbsita $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ e goethita $[\text{FeO}(\text{OH})]$. Estes minerais compuseram 13 arranjos (Tabela 4.3), sendo o mais abundante composto pelos minerais: quartzo, muscovita, caulinita e gibbsita (QMCG; $n=43$), que forma as amostras OBR, ARD, GDR-2 e ITA. Nesta última, este mesmo arranjo ocorre em 7 das 12 profundidades amostradas, e nos demais, ocasionalmente arranjos com hematita (QMCGH; $n=4$) e talco (QMCGT; $n=1$).

Em OBR, a presença do arranjo QMCG está associada à composição das rochas do Grupo Itacolomi, com predominância de quartzitos sericíticos e metaconglomerados (Dorr II 1969). Em ARD, ocorre nas rochas da Unidade Córrego da Paina (Grupo Nova Lima), mais propriamente nos quartzo-mica-clorita xistos com intercalações de plagioclásio-quartzo micaxistos e níveis finos de filitos grafitosos. Em GDR-2, ocorre nas rochas da Unidade Mindá (Grupo Nova Lima), composta por sericita/muscovita-quartzo e quartzo-sericita/muscovita xistos, também com poucos níveis de filitos grafitoso intercalados (CPRM, 2005). Em ITA, ocorrem as rochas do Grupo Itacolomi, em que

prevalecem os solos de textura arenosa associados aos quartzitos sercíticos, e ocorrência de hematita, associada à presença de quartzitos ferruginosos.

O segundo arranjo mais abundante é composto por quartzo, gibbsita e hematita (QGH; $n=23$), que ocorre nos cambissolos ferruginosos de GDR-1 e RLM. Ambas as UC se encontram sobre a Formação Gandarela, constituída por mármore dolomítico, filito dolomítico, itabirito dolomítico (Dorr II, 1969). No primeiro centímetro de solo coletado em RLM também foi verificada a presença de muscovita e caulinita ($n=1$).

O terceiro arranjo mais frequente está associado à UC FCH e é constituído por quartzo, hematita e goethita (QHGo; $n=11$). As amostras foram coletadas nos solos sobre a Formação Cauê, composta por itabirito e itabirito goethítico-limonítico (Franco & Endo 2004). Na coleta realizada entre o sexto e o nono centímetro do perfil de solo, ocorreu um arranjo do tipo QHGoC, com caulinita na sua composição ($n=1$).

O quarto arranjo mais abundante está associado à UC CAR e é constituído por quartzo e gibbsita (QG; $n=9$). O ponto amostral desta UC se encontra na Formação Moeda, composta por quartzitos e metaconglomerados, com camadas intercaladas de filito (CPRM, 2005). No quadragésimo centímetro desta UC ocorre um arranjo do tipo QGS, com sepiolita na sua composição ($n=1$). Por fim, do quinquagésimo ao sexagésimo centímetros, ocorre um arranjo do tipo QGSC, com sepiolita e caulinita na sua composição ($n=2$).

O quinto mais abundante está associado à UC UAI e é constituído por quartzo, muscovita e caulinita (QMC; $n=8$). As amostras foram coletadas sobre a Unidade Catarina Mendes (Grupo Nova Lima), composta por quartzo-feldspato-biotita-clorita-xisto (CPRM, 2005). Nos segundo, décimo segundo e quadragésimo centímetros desta UC ocorrem arranjos do tipo QMCMi, com feldspatos (microclínio) na sua composição ($n=3$). Por fim, no sexagésimo centímetro, ocorre um arranjo do tipo QMCMiB, com microclínio e biotita na sua composição ($n=2$).

A CATPCA, com as associações minerais que constituem os solos das UC, é representado na Figura 4.14. Nela, é possível notar a aproximação dos solos sobre itabirito (GRD-1, FCH e RLM), dos quartzitos (GRD-2, CAR e OBR) e dos xistos (UAI, ITA e ARD), mostrando a influência da litologia sobre a mineralogia de cada solo.

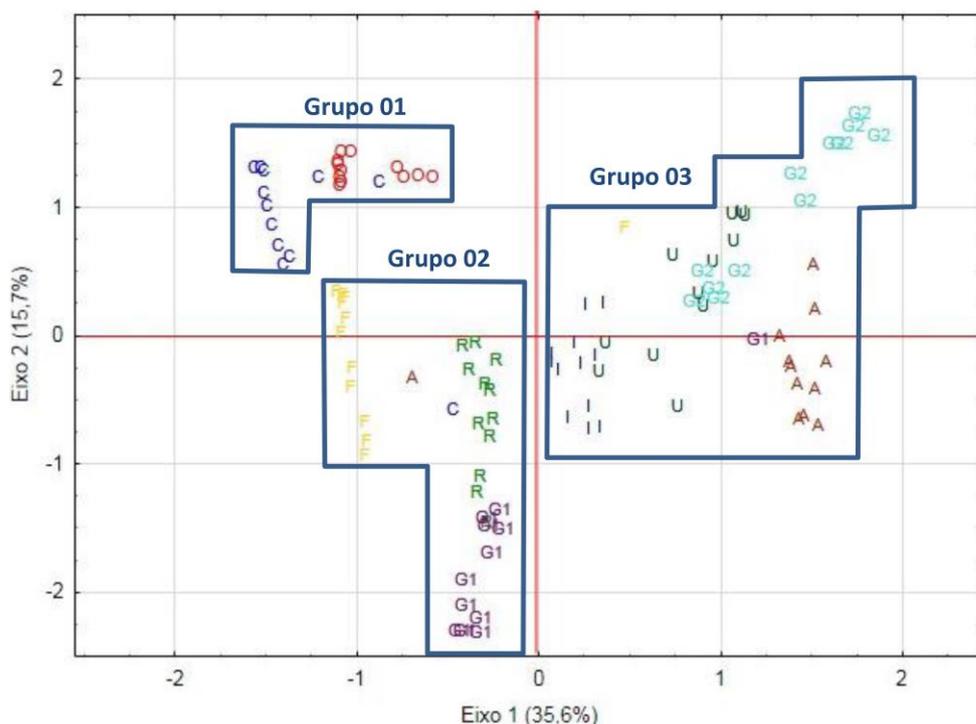


Figura 4.14 – Composição Mineral das UC, representadas da seguinte forma OBR (O), CAR (C), FCH (F), RLM (R), ITA (I), UAI (U), ARD (A), GDR-1 (G1), GDR-2 (G2).

4.4 – GEOQUÍMICA

A seguir serão apresentados os resultados e a discussão sobre a ocorrência do Carbono Orgânico Total (COT), presente no solo e originado da cobertura vegetal, e, dos elementos químicos estáveis, cuja origem está associada ao material de formação dos solos.

4.4.1 – Carbono Orgânico Total (COT)

As maiores concentrações de COT foram verificadas em amostras coletadas sob a fitofisionomia de Floresta Estacional Semidecidual (FES), e, os menores foram registrados em áreas formadas por Campo Rupestre (CPO). A ANOVA mostrou uma diferença significativa entre os teores de COT e a fitofisionomia ($N=108$, $df = 2$, $F = 5,38$ e $p = 0,006$). O teste de Tukey mostrou que os teores de COT, em amostras coletadas em áreas de FES, não diferem significativamente daquelas cuja coleta foi realizada em áreas de Cerrado (CER), mas diferem daquelas cuja coleta foi realizada em áreas de CPO. Por sua vez, as coletas realizadas em áreas de CER não diferem significativamente das amostras coletadas em áreas de CPO (Tabela 4.4). Como em ecossistemas tropicais o COT no solo é dependente da relação entre a produção de C derivado da fotossíntese e as perdas resultantes da oxidação microbiana, áreas com maior produção de serapilheira, como as formações florestais, tendem a apresentar valores mais elevados de matéria orgânica no solo.

Tabela 4.4 – Distribuição do Carbono Orgânico Total (COT) nos perfis de solos coletados nas Unidades de Conservação, sob diferentes fitofisionomias (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si)

UC	COT (dag kg ⁻¹)	Fitofisionomia	Diferença estatística
RLM	52,9	FES	a
GDR-1	49,4	FES	a
UAI	46,5	FES	a
ARD	45,4	CPO	b
ITA	40,0	FES	a
CAR	31,9	CER	ab
FCH	28,7	FES	a
GDR-2	27,2	CPO	b
OBR	20,3	CPO	b

Legenda: FES – floresta estacional semidecidual; CER – cerrado; CPO – campo.

A distribuição do COT por profundidade, como previsto, apresentou as maiores concentrações nos horizontes superficiais (horizontes A), como mostrado na Figura 4.15, sendo esta uma correlação significativa ($r=0,71, p=0,000$).

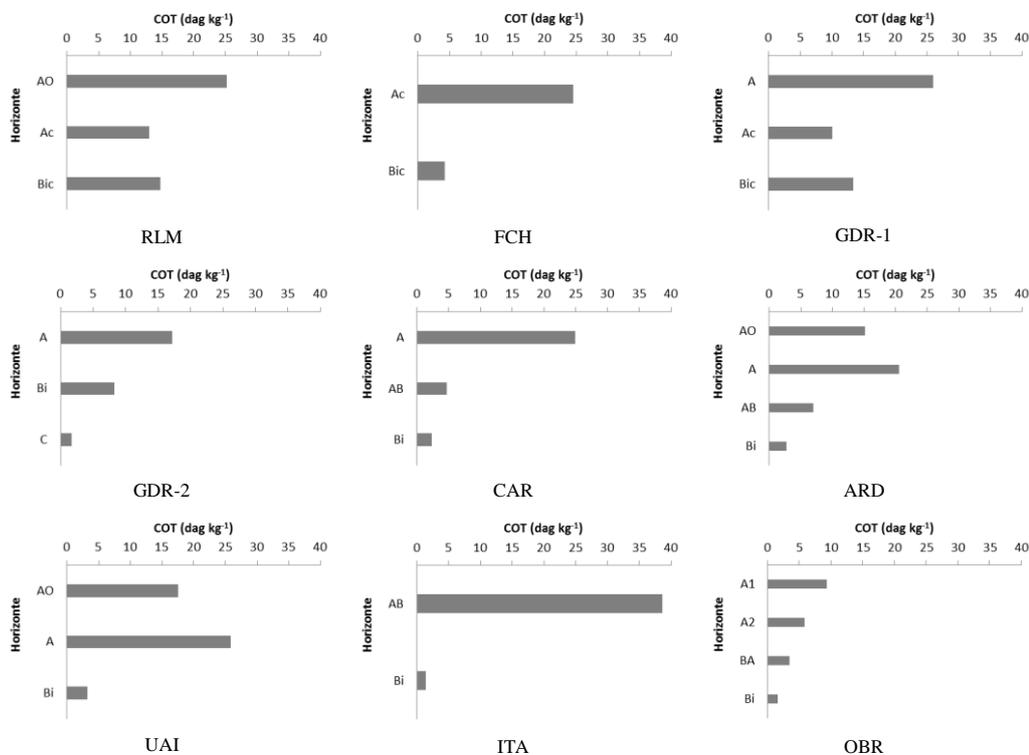


Figura 4.15 – Distribuição vertical do Carbono Orgânico Total (COT) no solo das diferentes Unidades de Conservação (UC).

4.4.2 – Elementos Estáveis

Os valores das concentrações dos elementos estáveis detectados nas análises químicas são apresentados no Apêndice A – Tabela A.2.

O Fe foi o elemento que ocorreu em maiores concentrações individuais, em especial nas unidades com solos derivados de itabiritos, que apresentaram hematita e/ou goetita em suas composições mineralógicas (GRD-1; RLM e FCH). O único elemento com o qual o Fe apresentou uma correlação significativa foi o P ($r=0,818$, $p=0,000$). A relação entre ferro e fósforo é bem conhecida, com vários trabalhos mostrando que a quantidade de fósforo presente nos solos depende de como este é adsorvido pelos óxidos e hidróxidos de ferro (Fink *et al.*, 2016). O Al apresentou as concentrações mais elevadas após às do Fe, compatível com o esperado para solos tropicais intemperizados, nas amostras das UC cuja composição mineralógica principal apresentou arranjos do tipo QMCG (GDR-2, ARD e ITA) ou QMC (UAI). São os solos derivados dos diferentes xistos, nos quais predominam micas e argilominerais (muscovita e caulinita, respectivamente) e hidróxidos de alumínio (gibbsita). O Al apresentou correlação significativa com diversos metais como Cr ($r=0,880$, $p=0,000$), Cu ($r=0,896$, $p=0,000$), Ni ($r=0,850$, $p=0,000$), Ti ($r=0,910$, $p=0,000$) e V ($r=0,961$, $p=0,000$), incorporados na superfície e na estrutura de óxidos e hidróxidos de Al e Fe (Bruggenwert & Kamphorst, 1979). No caso dos solos analisados, estes metais apresentam concentrações maiores em amostras com gibbsita se comparadas com amostras com goetita e menores que as amostras sem nenhum dos dois minerais mas com argilominerais, que são aluminossilicatos (Tabela 4.5)

Tabela 4.5 – Médias (mg.kg^{-1}) e resultados do teste de Tukey da ANOVA para metais pesados na presença de hidróxidos (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si)

	Cr	Cu	Ni	Ti	V
Apenas com gibbsita	276,8 ^b	33,10 ^a	64,04 ^b	5165 ^a	142,8 ^a
Apenas com goetita	80,4 ^b	14,18 ^a	18,66 ^b	991 ^b	34,1 ^b
Sem ambas	702,2 ^a	36,54 ^a	225,53 ^a	5471 ^a	184,8 ^a

A concentração de ambos elementos, Fe e Al, tende a permanecer relativamente constante com a profundidade (Figura 4.16). Cabe destaque para as variações bruscas da concentração destes elementos no perfil de algumas unidades, em sua amostra basal (Figura 4.16), o que poderia estar relacionado a um início do horizonte C nesta profundidade.

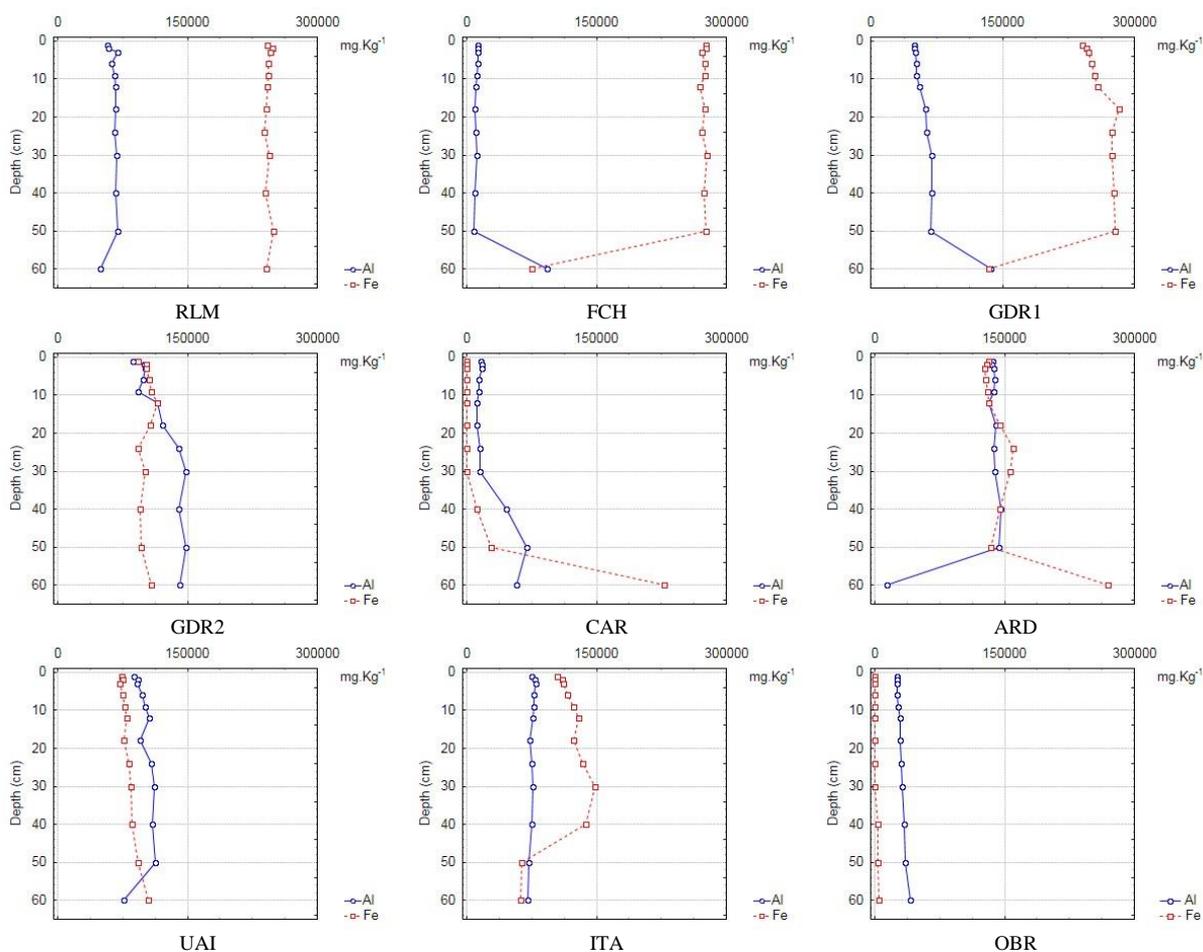


Figura 4.16 – Distribuição vertical das concentrações de Fe e Al nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.

A Figura 4.17 traz os gráficos com a distribuição dos elementos Na, Ti, Si, Mn e K nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC. As maiores concentrações de Na foram observadas nas amostras com muscovitas, em especial em GDR-2 (3298,0 – 5604,1 mg.kg-1) cujas concentrações são mais que o dobro das encontradas nas demais unidades. O Na apresentou correlação significativa com o Sr ($r=0,946$; $p=0,000$) e o Ba ($r=0,764$; $p=0,000$), ambos elementos comuns em micas brancas.

O Ti apresentou suas maiores concentrações nos solos derivados dos xistos (ARD, ITA e GDR-2), mas em especial em ARD (Ti 885,9 – 10.722,6mg.kg-1, média = 9331,2mg.kg-1). Nesta mesma UC ocorreram as maiores concentrações, não só de Ti, mas também de Cr (41,0-1.198,4 mg.kg-1), V (27,2-338,4 mg.kg-1), Ni (12,7-323,7 mg.kg-1) e Cu (15,2-120,3 mg.kg-1) e Sc (1,0-52,5 mg.kg-1). Além de sua correlação significativa com o Al, o Ti também apresenta correlação significativa com estes elementos [Cr ($r=0,738$, $p=0,000$), Cu ($r=0,851$, $p=0,000$), Ni ($r=0,646$, $p=0,000$) Sc ($r=0,879$, $p=0,000$) e V ($r=0,921$, $p=0,000$)], reforçando sua relação com a presença de gibsitita nos solos (Bruggenwert & Kamphorst, 1979).

O Si compõe os tetraedros de sílica, estrutura formadora de todos os silicatos, incluindo o quartzo (SiO₃), mineral que ocorre em todas as amostras. O Si apresentou maiores concentrações em ARD (639,0 – 12.242,2 mg.kg⁻¹). Essa foi a única UC a diferir significativamente das outras no que tange à concentração de Si, em função das elevadas concentrações encontradas nos primeiros 30cm. Não há diferenças significativas entre as profundidades dos perfis.

As maiores concentrações do Mn, semelhante com o que aconteceu com o Fe, ocorreram nos solos das UC GDR-1 (Mn 428,9-34321,6 mg.kg⁻¹), FCH (Mn 189,2-5.302,1 mg.kg⁻¹) e RLM Mn 2.546,1-33.314,8 mg.kg⁻¹). Apesar da correlação entre os dois elementos ser positiva e significativa, foi relativamente baixa ($r = 0,611, p = 0,000$). Também a covariância dos dois elementos foi positiva, as concentrações desses elementos variam de forma similar. É notória a forte afinidade geoquímica deste elemento com o Fe, em depósitos de minério do QF, que, são particularmente ricos em óxidos de Mn (Baioumy *et al.*, 2013; Gauzzi & Graça, 2018).

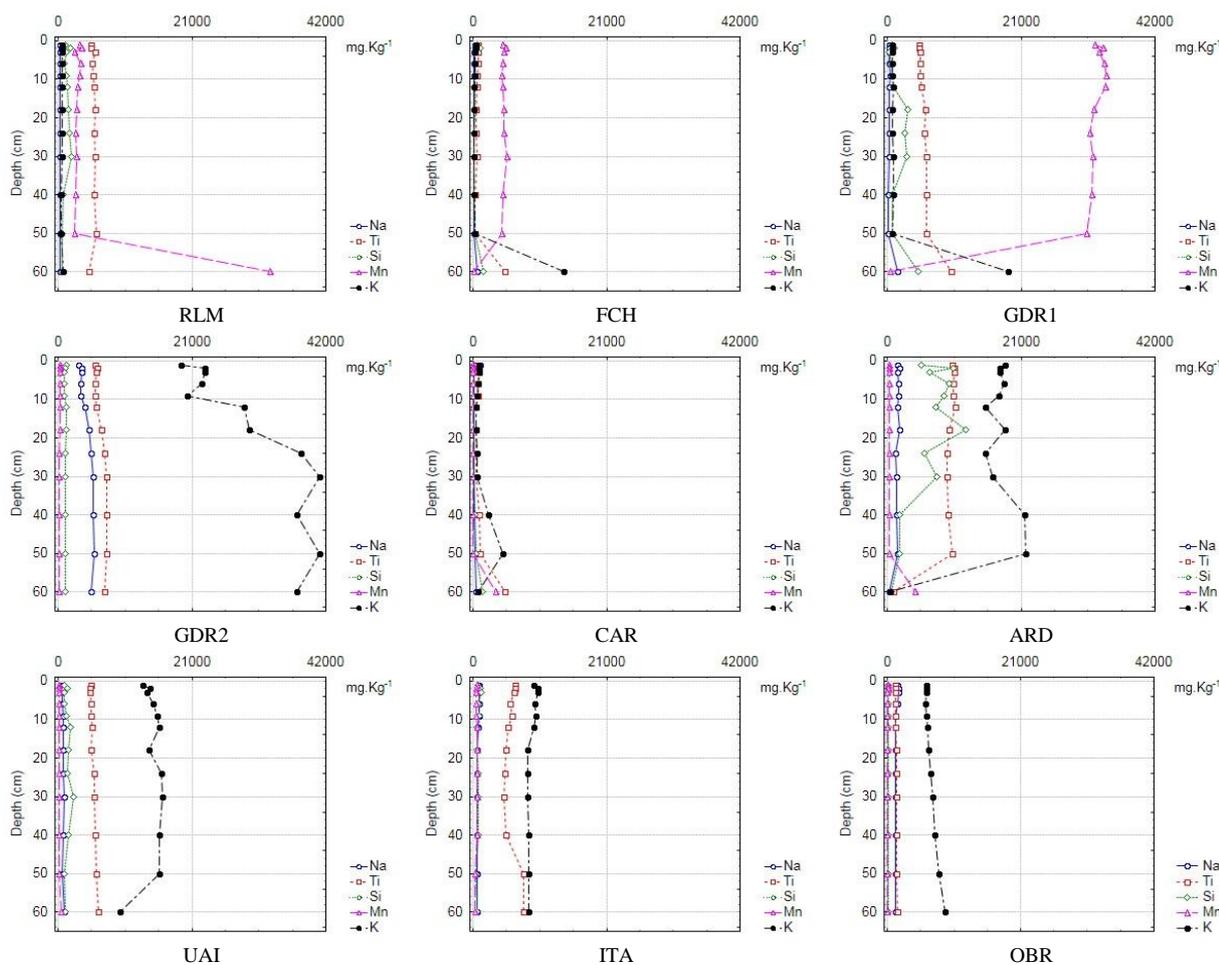


Figura 4.17 – Distribuição vertical das concentrações de Na, Ti, Si, Mn e K nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.

O K teve suas maiores concentrações em GDR-2 (19.247,8 – 41.067,5 mg.kg⁻¹), ARD (476,9 – 21.779,6 mg.kg⁻¹) e UAI (9.751,9 – 16.390,8 mg.kg⁻¹), e menores em FCH (78,7 – 14.291,4 mg.kg⁻¹) e RLM (512,1 – 818,4 mg.kg⁻¹). Apesar de não haver diferença significativa entre as profundidades, as unidades com solos derivados de mica xistos diferem estatisticamente das unidades, a exceção de ITA que não se separa estatisticamente de OBR (quartzito). O potássio é elemento formador de filossilicatos, como a muscovita, e k-feldspatos, comuns nestas rochas. O potássio apresentou correlação positiva e significativa com alguns dos elementos litófilos (afins com silicatos da classificação de Goldschmidt): Li ($r = 0,655$, $p = 0,000$), Y ($r = 0,657$, $p = 0,000$), Sc ($r = 0,837$, $p = 0,000$), Sr ($r = 0,858$, $p = 0,000$), V ($r = 0,748$, $p = 0,000$), Ba ($r = 0,830$, $p = 0,000$), Cr ($r = 0,752$, $p = 0,000$) e Na ($r = 0,895$, $p = 0,000$). Essa afinidade explica as baixas concentrações obtidas nas amostras de solos derivados de itabiritos (RLM, GDR-1 e FCH).

A Figura 4.18 traz as variações na profundidade das concentrações dos elementos Ca, Mg, S e Cr nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC. O Ca não demonstrou um padrão em sua distribuição nos solos das UC, nas diferentes profundidades. Sua maior concentração ocorreu entre 50 e 60 cm de profundidade em CAR (3228,0 mg.kg⁻¹), sendo este o único registro nesta unidade de conservação. Por sua vez, em RLM o Ca ocorreu em quase todas as profundidades, exceto entre 30 e 40 cm, e sua concentração variou entre (234-1673,2 mg.kg⁻¹). As maiores concentrações de Mg (203,3-2.431,4 mg.kg⁻¹) ocorreram em solos com muscovitas, principalmente aqueles com clorita-xistos em sua composição litológica, como ocorre nas UC UAI (1389,6 – 2431,4 mg.kg⁻¹) e ITA (1627,9 – 2223,4 mg.kg⁻¹). O Mg, assim como o potássio, apresentou correlação positiva e significativa com alguns dos elementos litófilos (afins com silicatos da classificação de Goldschmidt): Li ($r = 0,817$, $p = 0,000$), Y ($r = 0,681$, $p = 0,000$), Sc ($r = 0,736$, $p = 0,000$), Zr ($r = 0,763$, $p = 0,000$), Ni ($r = 0,747$, $p = 0,000$), V ($r = 0,707$, $p = 0,000$) e Cr ($r = 0,735$, $p = 0,000$).

O S se mostrou mais evidente nas amostras GDR-1 (393,9-1.356,0 mg.kg⁻¹). O enriquecimento em S pode ser explicado pelo fato desta UC ter na sua composição mineralógica principal arranjos do tipo QGH, nos quais predominam óxidos de ferro (hematita), uma vez que o S tende a precipitar-se e acumular-se na presença de óxidos (Schneider 1978; Hem 1978; Cohen 2003). Este elemento apresentou correlação significativa apenas com o Mn ($r = 0,806$, $p = 0,000$).

As maiores concentrações de Cr ocorreram nos solos derivados de xistos (ARD, UAI e GDR-2), dentre os quais ARD apresentou o maior registro (41,0-1198,4 mg.kg⁻¹). Como já mostrado, este elemento se correlacionou significativamente com o Al ($r=0,880$, $p=0,000$), Li ($r=0,749$, $p=0,000$), Sc ($r=0,926$, $p=0,000$), Cu ($r=0,891$, $p=0,000$), Ni ($r=0,948$, $p=0,000$), V ($r=0,914$, $p=0,000$), Mg ($r=0,735$, $p=0,000$), Ti ($r=0,737$, $p=0,000$), Si ($r=0,679$, $p=0,000$), e K ($r=0,751$, $p=0,000$).

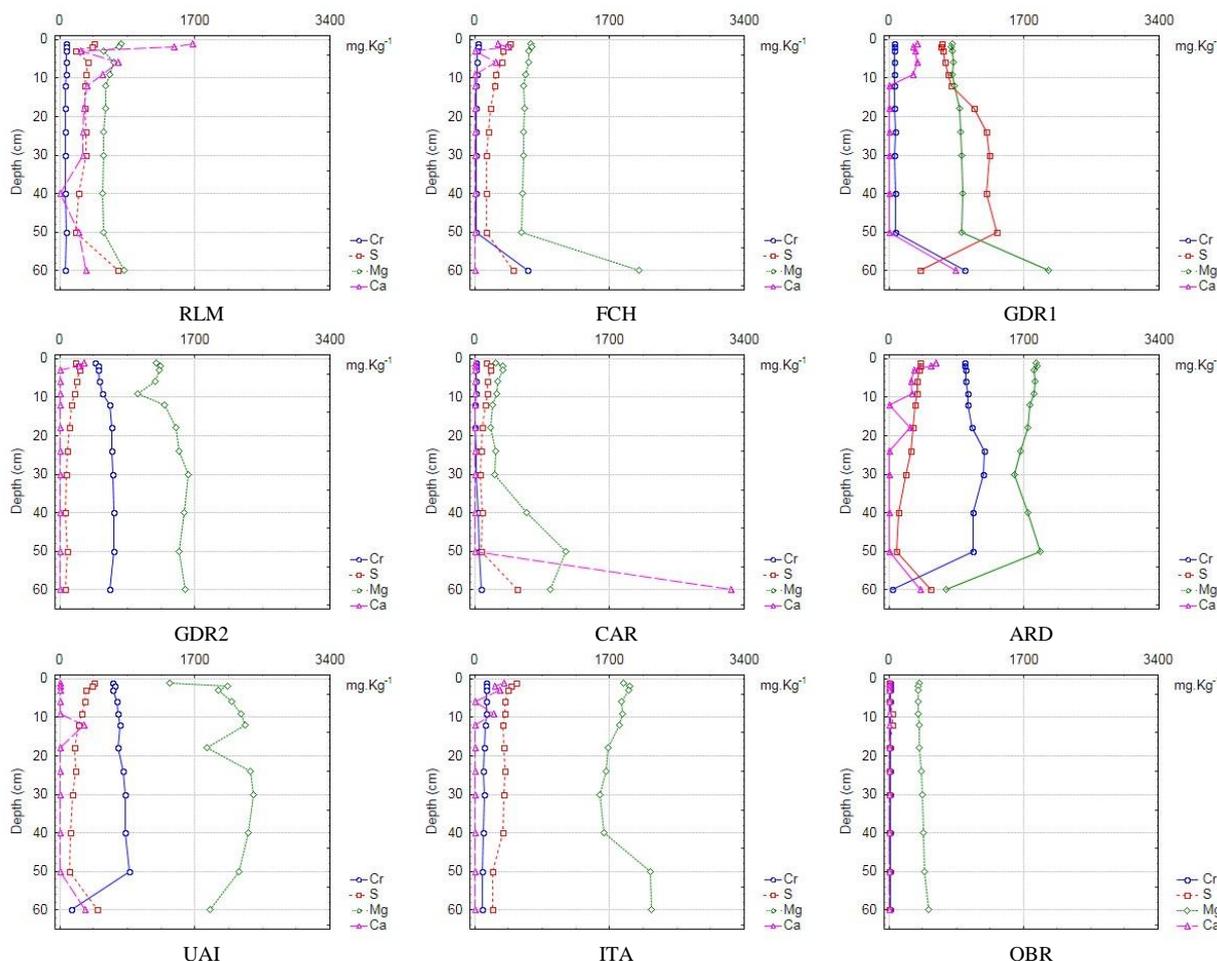


Figura 4.18 – Distribuição vertical das concentrações de Cr, S, Mg e Ca nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.

A Figura 4.19 traz as variações na profundidade das concentrações dos elementos: P, Ba, V, Ni e Zr. As maiores concentrações de P ocorreram em GDR-1 (622,4 – 906,5 mg.kg⁻¹) e as menores em OBR (66,4 – 85,4 mg.kg⁻¹). Apesar de não haver diferença significativa entre as profundidades, os solos sobre os quartzitos diferem significativamente das demais amostras (CAR – média = 120,57^d; OBR – média = 72,94^d mg.kg⁻¹), assim como o solo de GDR-1, sobre itabiritos. Como já mencionado anteriormente, a melhor correlação do P foi com o Fe ($r=0,818$, $p=0,000$). Amostras com hematita (média = 630,7^a mg.kg⁻¹) e hematita com e goetita (média = 527,8^a mg.kg⁻¹) diferem significativamente das demais (média = 332,3b mg.kg⁻¹), mas não das que apresentam gibsitita (média = 437,6ab mg.kg⁻¹). Também o alumínio tem um papel importante na concentração do fósforo em solos tropicais e subtropicais ácidos (pH < 5,0), em que formas de alumínio ativa do são capazes promover sua fixação nos hidróxidos como a gibsitita (Walker e Syers, 1976; Cross e Schlesinger, 1995).

O Ba apresentou maiores concentrações em GDR-2 (273,3 – 516,2 mg.kg⁻¹) e menores em CAR (24,6 – 193,8 mg.kg⁻¹). Apesar de não haver diferença significativa entre as profundidades, as

amostras com micas brancas, apresentam médias (média = 285,48^a mg.kg⁻¹) significativamente diferente das demais (média = 121,12^b mg.kg⁻¹). As menores concentrações de V também ocorreram em CAR (11 – 104,3 mg.kg⁻¹) e as maiores em ARD (27,2 – 338,4 mg.kg⁻¹). Apesar de não haver diferença significativa entre as profundidades, o V apresentou correlação significativa com o Al ($r=0,961$, $p=0,000$) e Ti ($r=0,921$, $p=0,000$), como já discutido, e diversos metais como Cr ($r=0,914$, $p=0,000$), Cu ($r=0,971$, $p=0,000$), Ni ($r=0,837$, $p=0,000$) e Sc ($r=0,983$, $p=0,000$), todos conhecidos por serem incorporados na superfície e na estrutura de óxidos e hidróxidos de Al e Fe.

O Ni apresentou maiores as concentrações em ARD (12,7– 323,7 mg.kg⁻¹) e não ocorre em OBR. Em CAR e FCH, registrou-se Ni apenas nas amostras coletadas em 60 cm de profundidade, cujas concentrações foram de 14,8 mg.kg⁻¹ e 223,9 mg.kg⁻¹, respectivamente. Apesar de não haver diferença significativa entre as profundidades, as médias das concentrações de Ni em UAI (média = 225,53^a mg.kg⁻¹), ARD (média = 199,72^a mg.kg⁻¹) e GDR-2 (média = 180,03^a mg.kg⁻¹), sobre quartzomica xistos, foram estatisticamente diferente das demais unidades, incluindo de ITA (média = 25,49^b mg.kg⁻¹), este solo sobre um mica-clorita xisto. O Ni apresentou correlação significativa com o Al ($r=0,961$, $p=0,000$), Ti ($r=0,921$, $p=0,000$) e V ($r=0,837$, $p=0,000$), como já discutido, e diversos metais como Cr ($r=0,950$, $p=0,000$), Cu ($r=0,811$, $p=0,000$) e Sc ($r=0,873$, $p=0,000$), corroborando a hipótese de sua adsorção por hidróxidos nos solos (Bruggenwert & Kamphorst, 1979). Já o Zr possui maiores concentrações em ITA (235,7 – 324,0 mg.kg⁻¹), e as menores em FCH (4,3 – 131,5 mg.kg⁻¹). Apesar de não haver diferença significativa entre as profundidades, as médias de suas concentrações nos xistos (ITA, GDR-2, ARD e UAI, média = 190,07 mg.kg⁻¹) são estatisticamente diferentes das encontradas nos demais solos (média = 54,13 mg.kg⁻¹). Aparentemente, a presença do Zr está relacionada à existência de biotita e muscovita nos solos, cujas concentrações médias (média = 157,30^a mg.kg⁻¹) são estatisticamente diferentes das que não possuem este mineral (média = 88,80^b mg.kg⁻¹).

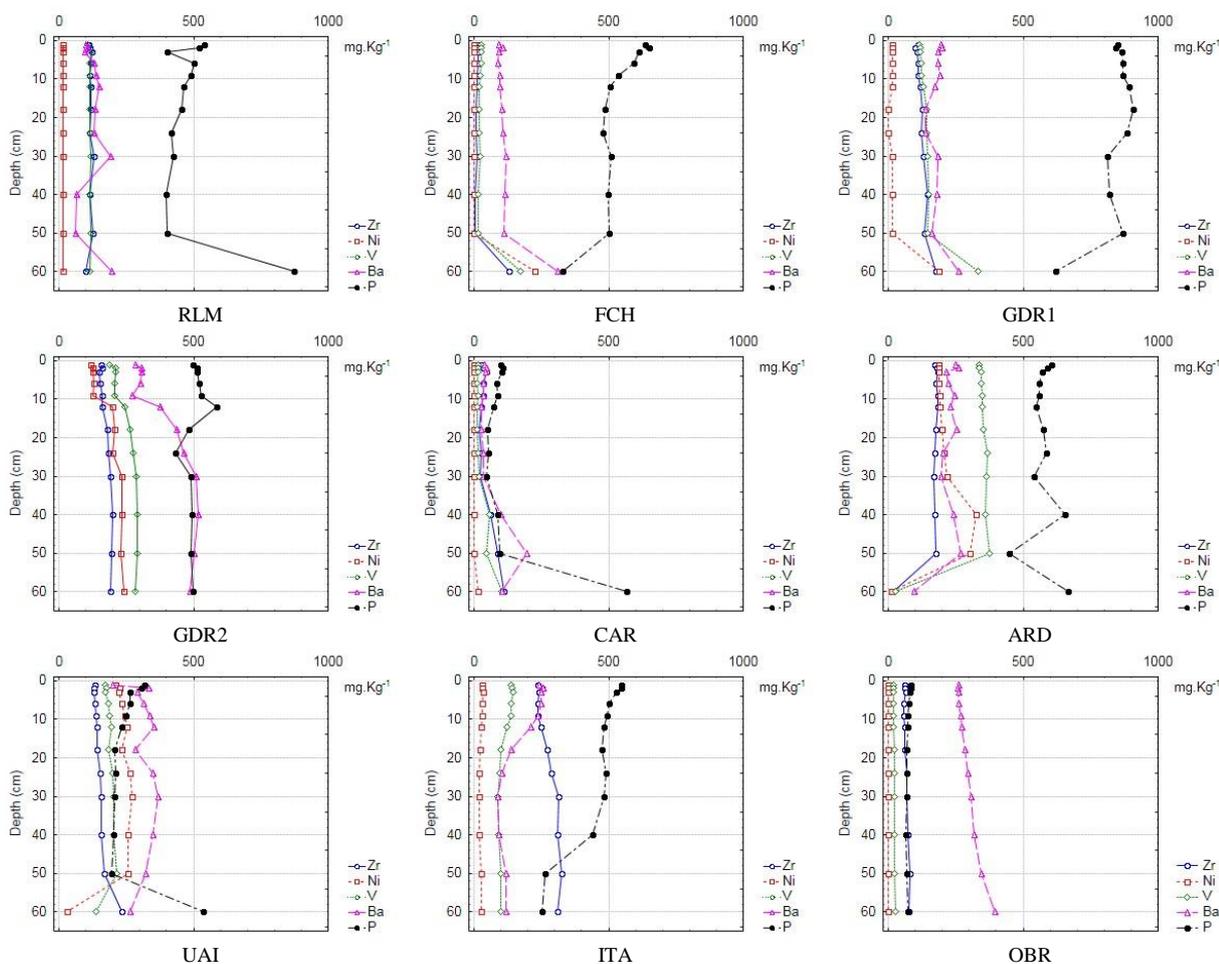


Figura 4.19 – Distribuição vertical das concentrações de P, Ba, V, Ni e Zr nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.

A Figura 4.20 traz as variações na profundidade das concentrações dos elementos: Sr, Cu, Zn e Co, que ocorreram em menores concentrações ao longo dos 60 centímetros do solo, porém ocorreram em mais de 80% das amostras. Em GDR-2 foram registrados os maiores teores de Sr (40,4 – 92,6 mg.kg⁻¹) e em CAR os menores (1,2 – 21,56 mg.kg⁻¹). Já os teores de Cu foram mais elevados em ARD (15,2 – 120,3 mg.kg⁻¹), nulos em OBR e menores em CAR (5,7 – 22,9 mg.kg⁻¹), onde verificou-se 3 ocorrências nas amostras mais profundas. O Cu ainda apresentou correlação significativa com o Al ($r=0,986$, $p=0,000$), Ni ($r=0,811$, $p=0,000$), Ti ($r=0,851$, $p=0,000$) e V ($r=0,971$, $p=0,000$), como já discutido, e diversos metais como Cr ($r=0,891$, $p=0,000$), e Sc ($r=0,956$, $p=0,000$), corroborando a hipótese de sua adsorção pela gibsitita (Bruggenwert & Kamphorst, 1979).

Os maiores valores de Zn ocorreram em GRD-2 (51,0 – 74,8 mg.kg⁻¹) e os menores em (0,9 – 58,4 mg.kg⁻¹). O Zn não apresentou correlações significativas importantes com os demais elementos estáveis, nem diferenças significativas entre as profundidades. As médias das amostras de solo sobre quartzitos (média = 3,278 mg.kg⁻¹) foram estatisticamente diferentes das demais unidades (média =

47,511 mg.kg⁻¹). O Co não apresentou correlações significativas importantes com os demais elementos estáveis, nem diferenças significativas entre as profundidades.

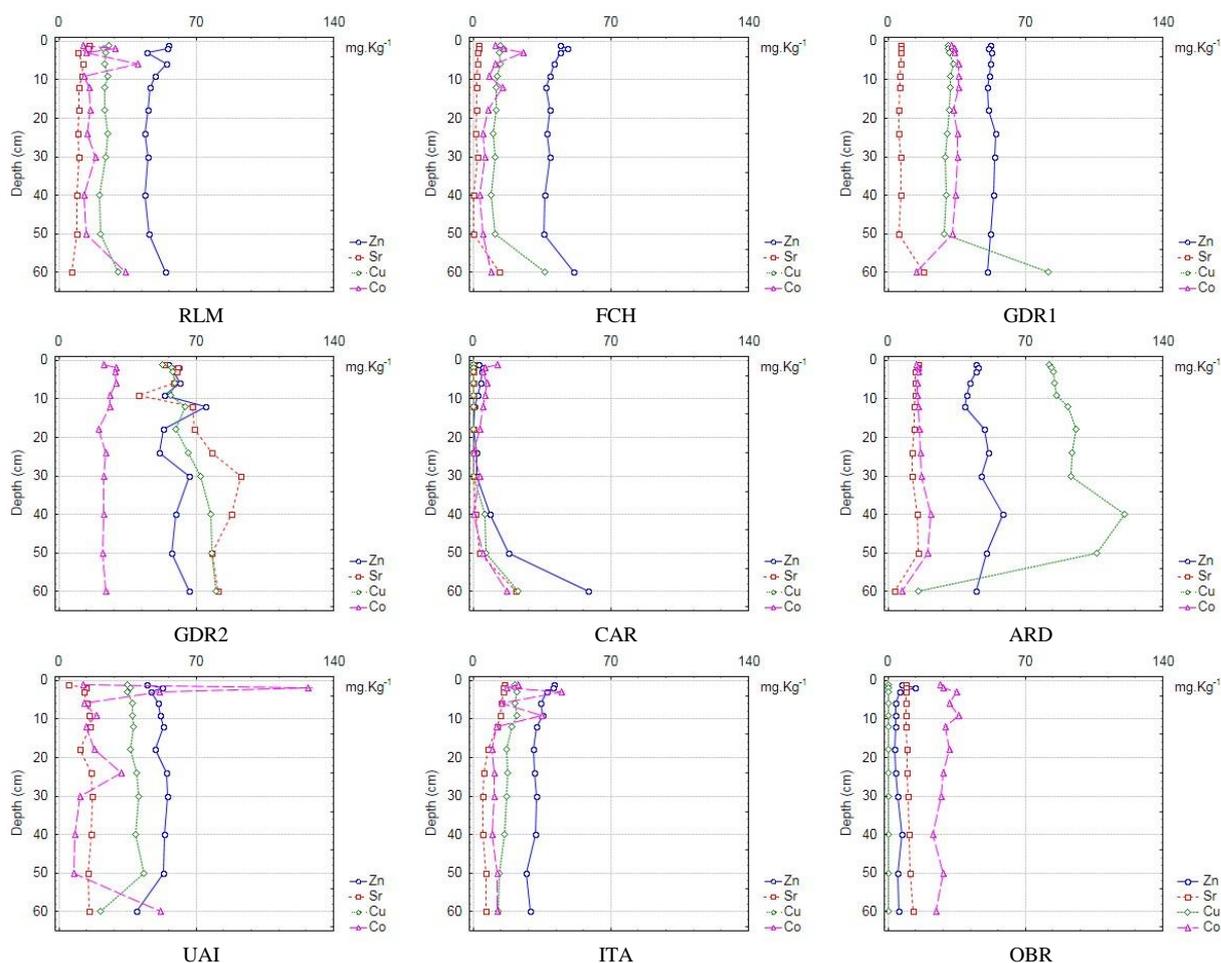


Figura 4.20 – Distribuição do Zn, Sr, Cu e Co nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.

O Y (Figura 4.21) apresentou maiores valores em ITA (15,3 – 39,6 mg.kg⁻¹) e menores em CAR (0,6 – 6,8 mg.kg⁻¹). Este elemento não apresentou correlações significativas entre as profundidades, mas, como o Zn, suas médias das amostras de solo sobre quartzitos (média = 2,133 mg.kg⁻¹) foram estatisticamente diferentes das demais unidades (média = 14,158 mg.kg⁻¹).

Em ARD e GRD-2, ocorreram, respectivamente, as concentrações mais altas de Sc (1,0-52,5 mg.kg⁻¹ e 26,8 – 46,9 mg.kg⁻¹), e em CAR as concentrações mais baixas (1,0-8,1 mg.kg⁻¹), que ocorreram em apenas três amostras (Figura 4.21). Em FCH ainda houve um registro de Sc na amostra coletada entre 50 e 60 cm, cuja concentração foi de 23,2 mg.kg⁻¹. Apesar de não haver diferença significativa entre as profundidades, as médias das concentrações de Sc em UAI (média = 22,558^b mg.kg⁻¹), ARD (média = 43,175^a mg.kg⁻¹) e GDR-2 (média = 37,308^a mg.kg⁻¹), sobre quartzo-mica xistos, foram estatisticamente diferente das demais unidades, incluindo de ITA (média = 15,517^c mg.kg⁻¹), este solo sobre um mica-clorita xisto. O Sc apresentou correlação significativa com o Al

($r=0,967$, $p=0,000$), Cu ($r=0,956$, $p=0,000$), Ni ($r=0,873$, $p=0,000$) e Ti ($r=0,879$, $p=0,000$) e V ($r=0,983$, $p=0,000$), como já discutido, e com o Cr ($r=0,926$, $p=0,000$), todos conhecidos por serem incorporados na superfície e na estrutura de óxidos e hidróxidos de Al e Fe (Bruggenwert & Kamphorst, 1979).

Os elementos com menores concentrações foram o As (22,3-33,7 mg.kg⁻¹), Th (30,0-32,7 mg.kg⁻¹), Pb (17,8-20,2 mg.kg⁻¹), Li (1,0-16,0 mg.kg⁻¹), Mo (2,6-4,1 mg.kg⁻¹), e Be (0,9-1,8 mg.kg⁻¹). Além da menor concentração, cinco destes seis elementos foram pouco representativos, ocorrendo entre 3-21% das amostras. Somente o Li foi quantificado em 93% delas, tendo as maiores concentrações registrada em UAI (4,3 – 16,0 mg.kg⁻¹) e as menores em CAR (1,2 – 4,2 mg.kg⁻¹), onde ocorreram apenas quatro registros. O As foi detectado apenas em três amostras em GDR-2 (22,3 a 33,7 mg.kg⁻¹), assim como o Th em ITA (30,0-32,7 mg.kg⁻¹mg.kg⁻¹). O Pb foi verificado em seis amostras de GDR-1(19,1 – 20,2 mg.kg⁻¹) e em duas amostras isoladas, uma em ITA (18,9 mg.kg⁻¹) e outra em RLM (17,8 mg.kg⁻¹). O Mo foi detectado em cinco amostras ITA (2,6 – 4,1 mg.kg⁻¹). O Be ocorreu nas amostras UAI (0,9 – 1,0 mg.kg⁻¹), ITA (0,9 – 1,8 mg.kg⁻¹) e GDR-2 (1,1 a 1,5 mg.kg⁻¹). Apesar de não haver diferença significativa das médias do Li entre as profundidades, as médias das concentrações de Li em UAI (média = 13,192^a mg.kg⁻¹), ARD (média = 5,7^e mg.kg⁻¹) e GDR-2 (média = 7,9^b mg.kg⁻¹), sobre quartzo-mica xistos, foram estatisticamente diferente das demais unidades, incluindo de ITA (média = 4,1^d mg.kg⁻¹), este solo sobre um mica-clorita xisto. Aparentemente, a presença do Li está relacionada à existência de muscovita nos solos, cujas concentrações médias (média = 6,533^a mg.kg⁻¹) são estatisticamente diferentes das que não possuem este mineral (média = 2,498^b mg.kg⁻¹).

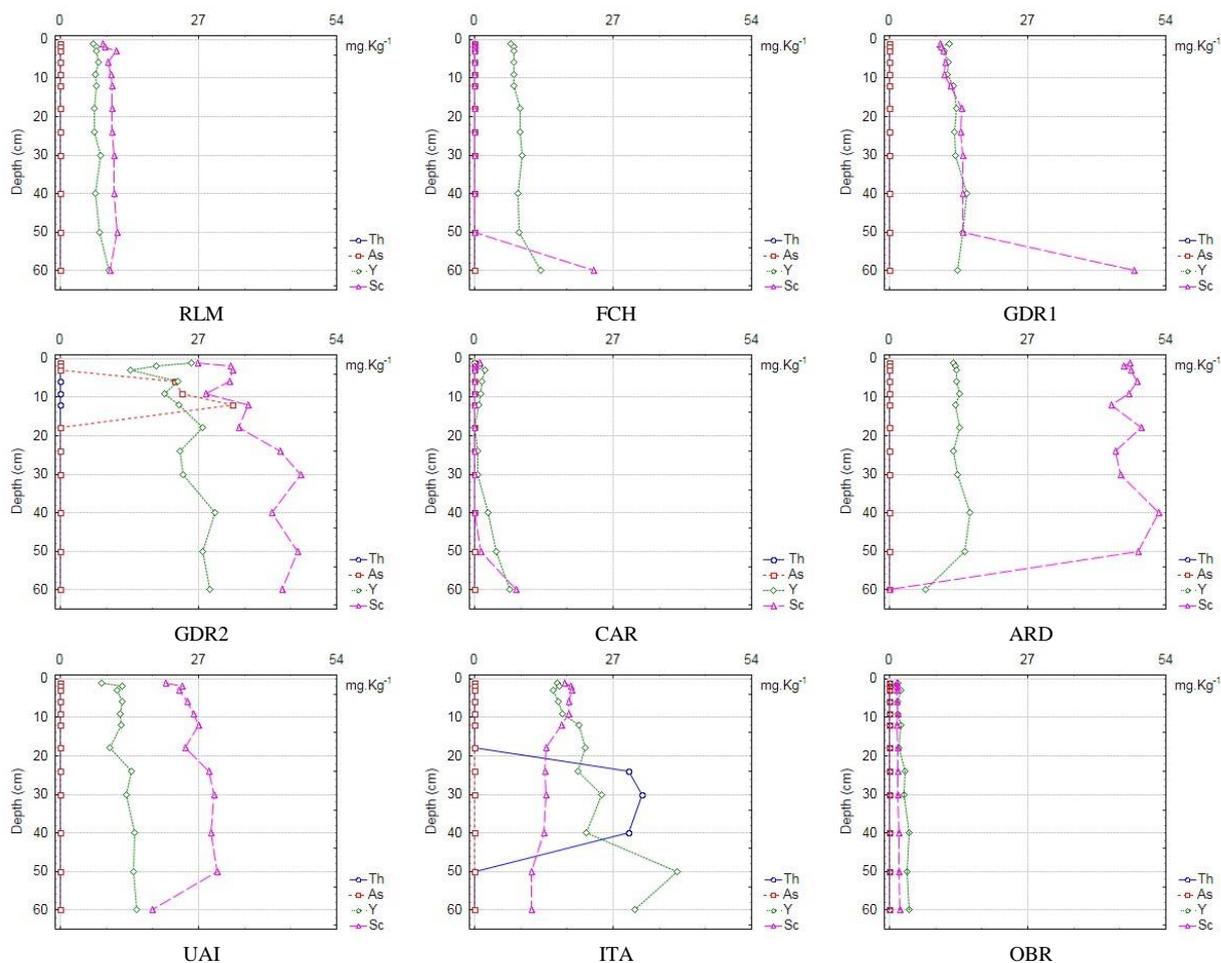


Figura 4.21 – Distribuição do Th, As, Y e Sc nas amostras de solo coletadas nas diferentes UC.

4.4.2.1 – Análise de Componentes Principais (PCA)

A PCA explicou 57,2% da variância dos dados (Figura 4.22). O eixo 1, representando 41,2% da variância explicada e o eixo 2, com 16% da variância explicada. A Tabela 4.6 traz os pesos de cada variável nestes dois componentes.

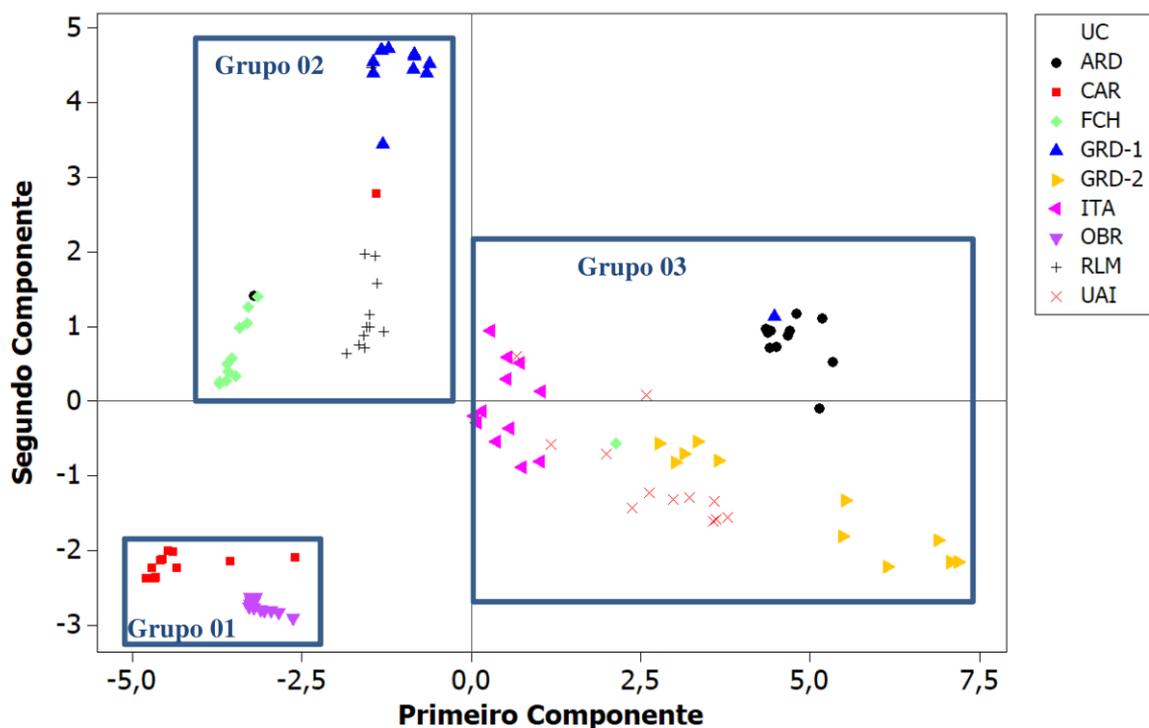


Figura 4.22 – Resultado da Análise de Componente Principal (PCA). Propriedades do Solo (n=35). Geoquímica – As, Cu, Mo, Ni, Th, Be, Ca, Pb, S, Li, Sc, Y, Zn, Sr, Cr, V, Co, Zr, P, Mn, Si, Ba, Mg, Ti, Na, K, Fe, Al.

Tabela 4.6 – Pesos das variáveis para componentes analisados

(continua)

Variável	PC1	PC2
Al	0,286	0,02
Sc	0,284	0,022
V	0,276	0,081
Cu	0,263	0,094
K	0,263	-0,166
Ni	0,261	-0,079
Cr	0,26	-0,035
Ti	0,25	0,159
Mg	0,238	0,01
Li	0,225	-0,053
Y	0,216	0,053
Ba	0,21	-0,145
Sr	0,204	-0,112
Zr	0,202	0,044
Na	0,202	-0,166
Zn	0,196	0,265

Tabela 4.6 – Pesos das variáveis para componentes analisados

(conclusão)

Variável	PC1	PC2
Si	0,159	0,116
Be	0,154	-0,145
P	0,081	0,424
As	0,061	-0,038
Co	0,049	0,107
Mo	0,004	-0,014
Th	0,001	-0,008
S	-0,001	0,414
Ca	-0,006	0,167
Fe	-0,017	0,393
Pb	-0,026	0,241
Mn	-0,052	0,381

À semelhança do que aconteceu com a CATPCA com os minerais, a PCA com as concentrações dos elementos estáveis permitiu separar, com exceção de quatro amostras, as unidades analisadas, que compõem três grupos distintos (Figura 4.22). O primeiro grupo, composto pelas unidades GDR-1, FCH e RLM, com os solos sobre os itabiritos; o grupo formado pelas unidades ARD, GRD-2, ITA e UAI, com solos sobre os xistos; e o grupo formado por OBR e CAR, formado por solos sobre quartzitos. As duas PCAs mostram um claro controle geogênico sobre a constituição mineralógica e, conseqüentemente, química dos cambissolos amostrados.

CAPÍTULO 5

ATIVIDADES, INVENTÁRIOS E DISTRIBUIÇÃO DE ^{137}CS , ^{210}PB E ^{238}U NOS SOLOS DO QF

5.1 – ^{137}CS

De uma forma geral, as maiores concentrações de atividades de ^{137}Cs ocorreram nos três primeiros centímetros do solo e 75% das concentrações totais foram registradas nos primeiros nove centímetros. Na maioria das amostras, o pico de atividade se deu nos três primeiros centímetros de profundidade, a partir da qual iniciou-se um decréscimo em relação às camadas inferiores (Figura 5.1). As UC apresentaram concentrações de ^{137}Cs em diferentes profundidades, alcançando 30cm em ARD (Figura 5.1) e com o máximo de atividade registrado em FCH (2,33 Bq.kg⁻¹).

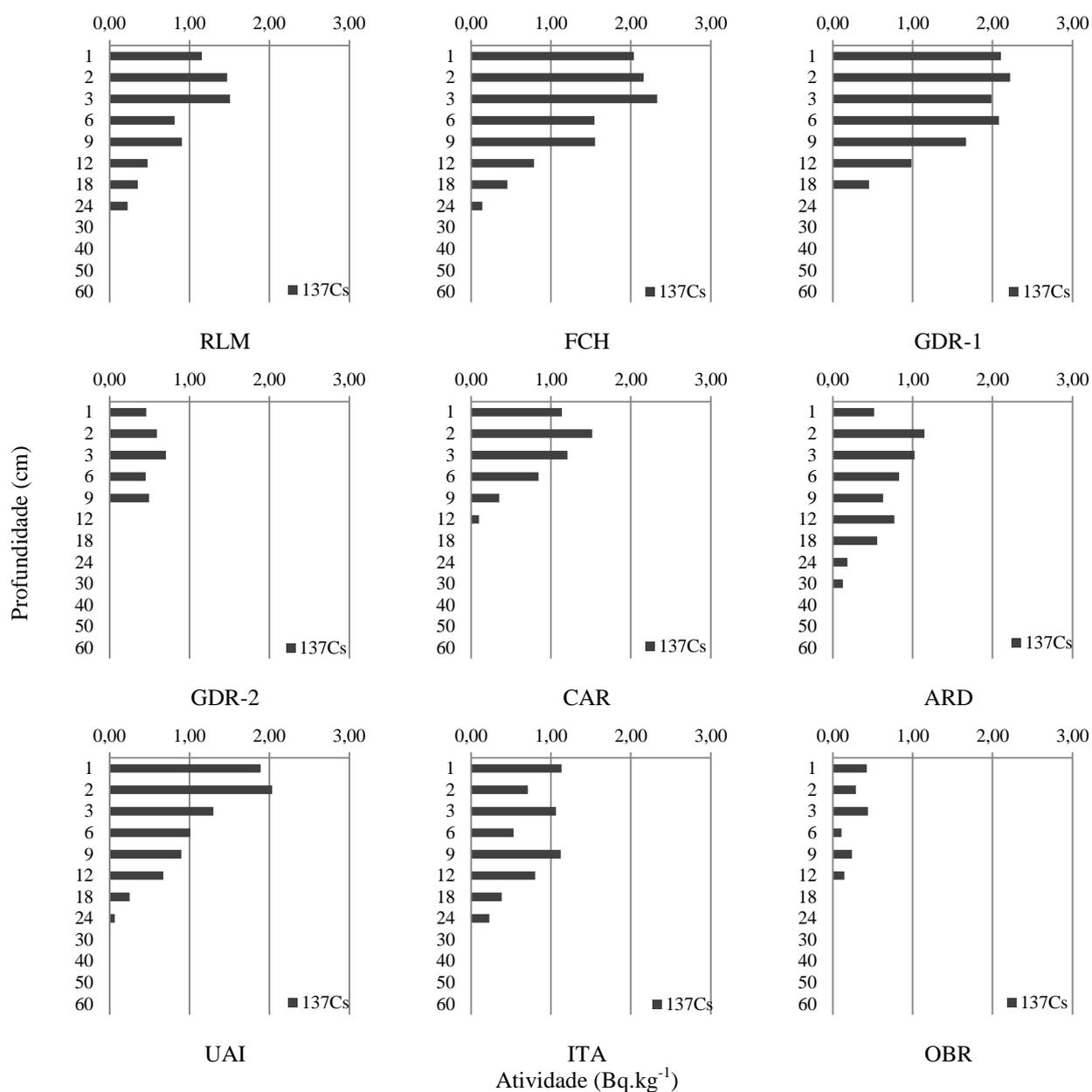


Figura 5.1 – Distribuição vertical da atividade do ^{137}Cs nos cambissolos das UC distribuídas no QF.

Os resultados da ANOVA mostraram diferenças significativas das concentrações da atividade do ^{137}Cs nas diferentes profundidades ($N=12$, $df = 11$, $F = 15,497$ e $p = 0,00000$). O teste de Tukey (Tabela 5.1) mostrou que, de um modo geral, as amostras coletadas entre 1-9 cm não diferiram entre si, assim como as amostras entre 24 e 60 cm, sendo estas últimas estatisticamente diferentes das amostras mais superficiais (1-9 cm). Estes dados permitiram confirmar a tendência de mobilização do ^{137}Cs nas camadas superficiais do solo (Ritchie *et al.*, 1974; Hutchison-Benson *et al.*, 1985; Xinbao *et al.*, 1990; Zygmunt *et al.*, 1998; Lauria *et al.*, 2007; Navas *et al.*, 2018).

Tabela 5.1 – Média de concentração de atividade do ^{137}Cs nas Unidades de Conservação (UC) em função da profundidade amostrada (letras iguais identificam médias estatisticamente não diferentes entre si)

Profundidade (cm)	Média (Bq.kg ⁻¹)
0-1	1,206 ^a
1-2	1,349 ^a
2-3	1,284 ^a
3-6	0,912 ^{ab}
6-9	0,873 ^{ab}
9-12	0,527 ^{bc}
12-18	0,272 ^{bc}
18-24	0,094 ^c
24-30	0,014 ^c
30-40	0,000 ^c
40-50	0,000 ^c
50-60	0,000 ^c

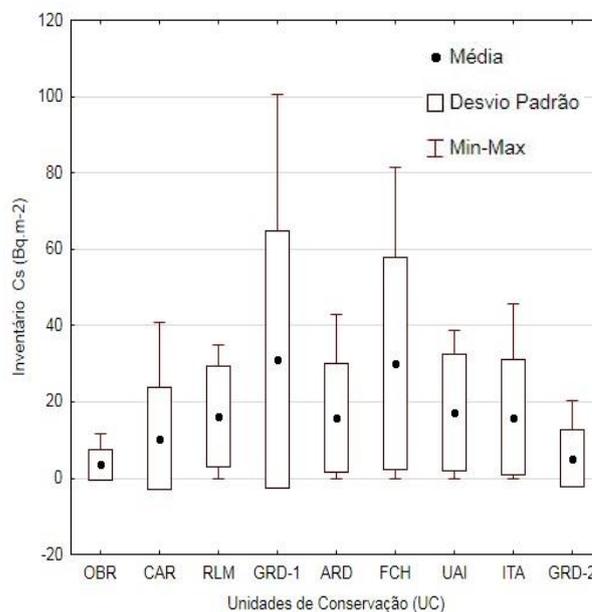
Segundo Andrello *et al.*, (1997), a concentração de atividade do ^{137}Cs para os solos brasileiros ocorrem entre 0,79-4,79Bq.kg⁻¹. Corrigindo-se o decréscimo da atividade em função da meia-vida do ^{137}Cs , o intervalo atual seria entre 0,45-2,76Bq.kg⁻¹. Assim, estariam incluídas neste intervalo 48 das 65 amostras que apresentaram algum pico de atividade do ^{137}Cs , entre 0,06-2,33 Bq.kg⁻¹ (74%). Entre as 17 amostras que apresentaram atividade menor que 0,5Bq.kg⁻¹, apenas 6 encontram-se entre 1-9 cm (9%), distribuídas em OBR e CAR. Notoriamente, os solos destas duas UC possuem baixos teores de Carbono Orgânico (COT), são desenvolvidos sobre quartzitos e possuem texturas franco-arenosa e arenosa, respectivamente, conferindo-lhes um boa permeabilidade. Os mesmos encontram-se individualizados na PCA com os dados mineralógicos (Figura 4.14), que, aparentemente, possuem uma associação mais estreita com a atividade de ^{137}Cs no solo.

As variações das concentrações de atividade (0,06-2,33 Bq.kg⁻¹) estão coerentes com os valores esperados para região do QF, localizado entre as latitudes 20°00” e 20°30”S. Recentemente, Correa *et al.* (2018), estudando solos da Cordilheira dos Andes no Chile – latitude 33°56’ S (amostras de andisolos em áreas de pouca vegetação), encontraram valores entre 0,97±0,16 e 21,32±0,56 Bq.kg⁻¹. No Brasil, Antunes *et al.* (2010), ao analisarem solos em Pernambuco, encontraram em Goiana (mata atlântica), Sertânia (caatinga) e Araripina (cerrado/caatinga), entre as latitudes 8°00” S e 7°30” S, concentrações de atividade do ^{137}Cs variando entre 0,5 a 2,06 Bq.kg⁻¹; Macêdo (2009), por sua vez, verificou na bacia do rio Indaiá (MG), entre as latitudes 19°25” S e 18°35” S concentrações entre 0,1 a 2 Bq.kg⁻¹; Andrello *et al.* (2002), em matas de Londrina-PR, na latitude 23°19” S, encontraram um intervalo entre 0,2 – 4,0 Bq.m⁻².

As concentrações de atividade diagnosticadas refletiram os inventários de estoques de ^{137}Cs , cuja média foi $193,76 \pm 3,65\text{Bq.m}^{-2}$, com um desvio padrão de $107,95\text{Bq.m}^{-2}$ (Figura 5.2a), para os solos das UC. Em GDR-1 e FCH foram registrados os maiores estoques de césio, $374,19 \pm 4,24\text{Bq.m}^{-2}$ e $359,11 \pm 3,76\text{Bq.m}^{-2}$ respectivamente. OBR e GDR-2 registraram os menores estoques, $42,56 \pm 3,47\text{Bq.m}^{-2}$ e $62,50 \pm 3,59 \text{Bq.m}^{-2}$, respectivamente. Nas demais áreas, os estoques permaneceram próximos ao valor médio (Figura 5.2a). A análise estatística (ANOVA) mostrou uma diferença significativa em relação à atividade do ^{137}Cs nos solos das diferentes UC ($N=9$, $df = 8$, $F = 2,320$ e $p = 0,025$). Entretanto, o teste de Tukey mostrou que apenas OBR difere significativamente de GDR-1, e que as demais UC não mostraram diferenças significativas entre si nem com OBR e GDR-1 (Figura 5.2b).

Amostra	Inventário de ^{137}Cs (Bq.m^{-2})*	Latitude (S)	Correlação COT x ^{137}Cs
GDR-1	$374,19 \pm 4,24^b$	20°01'	$r = 0,956$, $p = 0,000$
RLM	$195,11 \pm 3,60^{ab}$	20°03'	$r = 0,927$, $p = 0,000$
FCH	$359,11 \pm 3,76^{ab}$	20°04'	$r = 0,746$, $p = 0,005$
GDR-2	$62,50 \pm 2,99^{ab}$	20°05'	$r = 0,873$, $p = 0,000$
CAR	$124,73 \pm 2,18^{ab}$	20°06'	$r = 0,906$, $p = 0,000$
ARD	$190,28 \pm 4,94^{ab}$	20°16'	$r = 0,927$, $p = 0,000$
UAI	$204,43 \pm 3,31^{ab}$	20°16'	$r = 0,879$, $p = 0,000$
ITA	$190,96 \pm 4,33^{ab}$	20°27'	$r = 0,830$, $p = 0,001$
OBR	$42,56 \pm 3,47^a$	20°30'	$r = 0,420$, $p = 0,174$
Média	$193,76 \pm 3,65$	-	-

(a)



(b)

Figura 5.2 – (a) Inventário de ^{137}Cs em solos não perturbados do QF e representação da diferença estatística obtida pela ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$), onde as letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si; (b) Gráfico de distribuição do ^{137}Cs entre as UC.

Existe uma tendência de redução dos estoques de ^{137}Cs no solo em menores latitudes, próximo à linha do equador (Tabela 5.2), cuja evidência é indicada por alguns estudos realizados na América do Sul (Hutchison-Benson *et al.*, 1985; Schuch *et al.*, 1994, Andrello *et al.*, 2009, Antunes *et al.*, 2010; Montes *et al.*, 2013). Neste contexto, a média dos estoques de ^{137}Cs ($193,76 \pm 3,65 \text{Bq.m}^{-2}$) verificada neste trabalho, encontra-se no intervalo previsto, considerando que as UC encontram-se entre as latitudes 20°00” e 20°30”S (Figura 5.2a). Por outro lado, no âmbito do QF, essa tendência se mostra inconsistente, pois foram verificados altos estoques em UC ao norte (p.ex GRD-1 com $374,19 \pm 4,24 \text{Bq.kg}^{-1}$) e baixos estoques em UC ao sul (p.ex GRD-1 com $42,56 \pm 3,47 \text{Bq.kg}^{-1}$). Tal fato, revela a influência de outras variáveis no comportamento da distribuição do ^{137}Cs no solo do QF.

Tabela 5.2 – Relação de inventários de ^{137}Cs no Brasil e em uma região na Argentina

Autor	Ano	Inventário (Bq.m ⁻²)	± (Bq.m ⁻²)	Latitude (S)	Informações
Farias (2008) <i>apud</i> Andrelo <i>et al.</i> (2009)	2009	16	1	6°35'	Solos arenosos.
Antunes <i>et al.</i>	2010	71,6	6,3	7°30'	Floresta Atlântica. Espodossolo arenoso.
		95,5	9,8	7°30'	Cerrado/caatinga. Latossolo franco arenoso.
		64,0	13,8	8°00'	Caatinga. Neossolo litólico.
Soares <i>et al.</i>	2009	29	9	11°30' 12°30'	Neossolo quartzarênico.
Macêdo	2009	227,0	-	19°25'	Floresta estacional. Solo argiloso.
		102,0	-	18°35'	Floresta estacional. Solo arenoso.
Correchel <i>et al.</i>	2005	253,0	46,0	22°09'	Área de cultivo. Latossolo.
		224,0	37,0	22°40'	Área de cultivo. Latossolo.
		314,0	34,0	22°42'	Aterro ± 80 anos.
		250,0	77,0	22°47'	Área de cultivo. Latossolo.
Andrelo <i>et al.</i>	2002	241,0	9,0	23°19'	Floresta Atlântica. Latossolo.
		338,0	9,0	23°19'	Floresta Atlântica. Latossolo.
		325,0	7,0	23°19'	Floresta Atlântica. Latossolo.
Andrelo <i>et al.</i>	2009	420	39	25°30'	Não informado.
Montes <i>et al.</i>	2013	740,0	148,0	34°54'	Unidade de Conservação.
		829,0	148,0	34°54'	Unidade de Conservação.
		1095,0	178,0	34°48'	Unidade de Conservação.
		1184,0	178,0	35°30'	Unidade de Conservação.

A variável que apresentou melhor correlação com a distribuição do ^{137}Cs foi o COT ($r = 0,794$, $p = 0,000$; Apêndice A – Tabela A.1), como pode ser observado nos gráficos da Figura 5.3, que mostram a proporcionalidade de redução da atividade do ^{137}Cs e do COT com a profundidade.

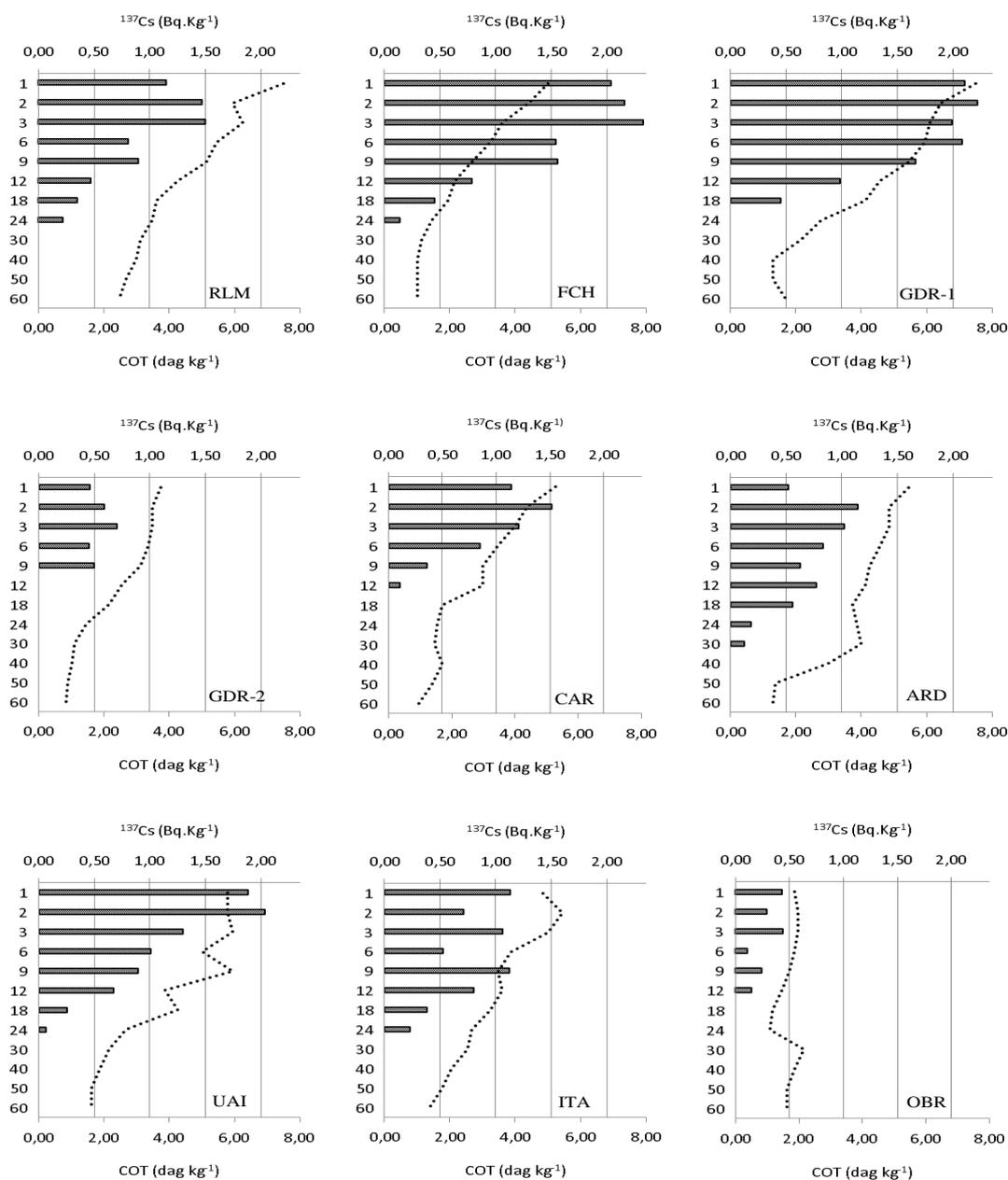


Figura 5.3 – Relação entre a atividade do ^{137}Cs (Bq.kg^{-1}) indicada pelas barras, e o Carbono Orgânico Total (COT - dag.kg^{-1}), indicado pela linha pontilhada, ao longo dos 60 cm de profundidade.

Mabit & Bernard (1998), pesquisaram, no norte da França ($49^{\circ}17'N$ e $3^{\circ}18'E$), a correlação entre o ^{137}Cs com outras 15 variáveis químicas, em solos siltosos, ricos em COT ($\sim 1,5\%$) e localizados em áreas florestais. Concluíram que apenas o COT, indicou correlação forte com o radionuclídeo ($r = 0,79$, $p = 0,001$). Em um estudo mais recente, Nosrati *et al.* (2015) também verificaram correlação forte entre o ^{137}Cs e o COT em solos não perturbados de uma região montanhosa do Irã ($46^{\circ} 7'E$, $35^{\circ} 40'N$ – $r = 0,9$, $p = 0,0001$), porém, fraca em solos cultivados ($r = 0,47$, $p = 0,0001$). No hemisfério sul, Martinez *et al.* (2010) também verificaram correlações fortes entre o ^{137}Cs e o COT, em solos australianos ($150^{\circ}07'E$; $32^{\circ}05'S$ – $r=0.72-0.95$ $p=0,05-0,001$). No Brasil, Correchel *et al.* (2005)

verificou correlação forte e significativa em três, de quatro áreas amostrais (Tabela 5.2), sendo R1 ($r = 0,94$; $p < 0,01$), R2 ($r = 0,93$; $p < 0,001$) e R4 ($r = 0,86$; $p < 0,001$). Em R3, a correlação foi fraca ($r = 0,52$; $P < 0,1$). Antunes *et al.* (2010), embora não tenham verificado uma correlação forte entre o ^{137}Cs e o COT em amostras de solos do nordeste do Brasil, observaram uma relação entre a maior atividade observada ($2,06 \text{ Bq.kg}^{-1}$) e o horizonte orgânico de um dos perfis. Essas correlações refletem a tendência do ^{137}Cs ser adsorvido pela matéria orgânica (Guimarães & Andrello, 2001).

A tendência de correlação forte entre o ^{137}Cs e o COT, também é visualizada nas amostras de solos das UC do QF, exceto pela amostra OBR, a única a apresentar correlação fraca ($r = 0,420$, $p = 0,174$). Essa amostra também apresentou as menores concentrações de atividades e de estoques de ^{137}Cs , bem como menores estoques de COT ao longo do perfil estudado (Figura 5.2a e Figura 5.4). Trata-se de um cambissolo raso, cujas condições pedoclimáticas permitem o desenvolvimento apenas de gramíneas (Dias *et al.*, 2003).

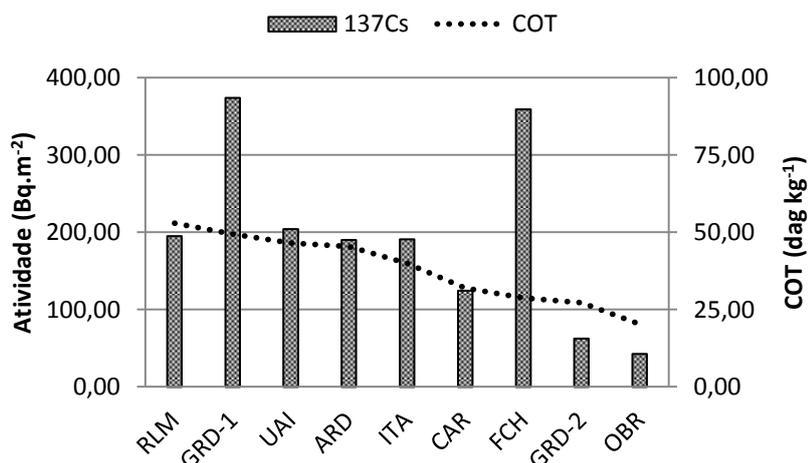


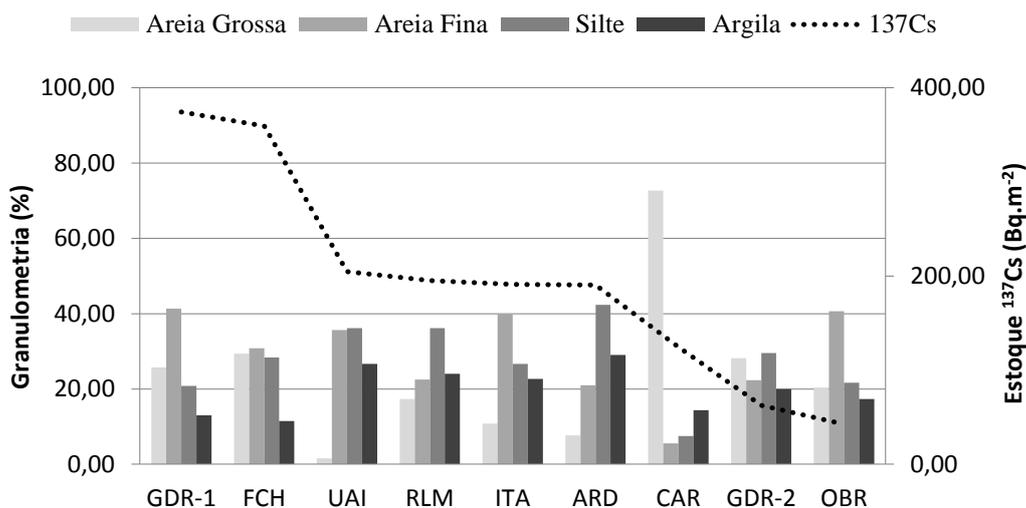
Figura 5.4 – Relação entre os estoques de COT e de ^{137}Cs entre nos perfis de solo (0-60cm) das Unidades de Conservação.

Os resultados mostram baixas correlações entre as diferentes faixas granulométricas dos cambissolos estudados e a distribuição do ^{137}Cs (Tabela 5.3), com destaques para as correlações negativas com os percentuais de areia grossa e silte e a baixa significância da correlação com os percentuais de areia fina. A relação entre os estoques de ^{137}Cs e a média granulométrica de cada UC permite verificar um estoque de ^{137}Cs constante e próximo à média ($193,76 \pm 3,65 \text{ Bq.m}^{-2}$) em amostras com composições de solo menos arenosas, tais como ARD, UAI, RLM, e ITA (Figura 5.5), por outro lado, em solos mais arenosos, em especial àqueles desenvolvidos sobre os quartzitos como CAR e OBR, os estoques totais de ^{137}Cs foram menores e sua distribuição no perfil mais uniforme, corroborando as verificações de Correchel *et al.* (2005). Ainda assim, não é possível afirmar que a granulometria, neste estudo, tenha sido uma variável preponderante na adsorção do ^{137}Cs .

Tabela 5.3 – Resultados das correlações e covariâncias do ^{137}Cs e a granulometria

^{137}Cs	Areia total	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
correlação	$r = 0,031$, $p=0,753$	$r = -0,119$, $p=0,221$	$r = 0,275$, $p=0,004$	$r = -0,168$, $p=0,082$	$r = 0,166$, $p=0,086$
covariância	-1,644	2,424	0,361	-1,401	0,877

Apesar de não ter sido encontrada uma correlação significativa entre a concentração do ^{137}Cs e o percentual de argila das amostras, há covariâncias positivas com os teores de areias e argila (Tabela 5.3); ou seja, existe uma relação positiva entre estas variáveis. O conteúdo de argila é considerado um importante parâmetro na adsorção deste radionuclídeo (Santos, 2004, Fraga & Salcedo, 2004; Antunes *et al.* (2010). Em GDR-1 e FCH, ocorreram altas concentrações de estoque de ^{137}Cs sob baixas concentrações de argila, conforme mostrado na Figura 5.5. Este comportamento pode estar relacionado às associações minerais que compõem os solos de GDR-1 e FCH, QHG e QHGo respectivamente. Wasserman *et al.* (2008) estudaram a mobilidade do ^{137}Cs em solos com diferentes culturas artificialmente contaminados com ^{137}Cs em lisímetros e encontraram uma grande afinidade deste radionuclídeo com a presença de hidróxidos de Al e Fe, contrapondo o estudo mais antigo de Cornell (1993) que apontava a gibbsita e os óxidos de Fe como pobres sorventes de ^{137}Cs . Os testes de Kulyukhin *et al.* (2015) com hidróxidos de Fe e Al (contendo Mg, Cu, Ni, Zn) para a descontaminação de ^{137}Cs de soluções aquosas corroboram os achados de Wasserman *et al.* (2008) sobre a afinidade do ^{137}Cs com hidróxidos e as correlações encontradas entre Cu, Ni e Zn com a presença de gibbsita nos solos estudados.

**Figura 5.5** – Relação entre os estoques de ^{137}Cs e a média granulométrica em cada Unidade de Conservação.

Em GDR-1 e FCH, as concentrações de ^{137}Cs foram anômalas em comparação com as das demais UC (Figura 5.5). Apesar de não terem sido verificadas correlações entre ^{137}Cs com elementos

químicos estáveis presentes no solo das amostras. essas anomalias podem estar associadas às altas concentrações de Fe, Mn e Co, que, segundo a Análise de Componente Principal (PCA) também estão correlacionados com a presença de ^{137}Cs (Figura 5.14).

5.2 – ^{210}Pb

As concentrações de atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ também foram maiores nas amostras superficiais dos solos, devido às entradas contínuas de chumbo atmosférico (Moore & Poet, 1976; Persson, 2016). Foi verificado que 64% desta concentração ocorreu nos primeiros 9 cm e 75% até 18 cm. Estes resultados confirmaram uma tendência de contribuição do $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ originado do “*fallout*” (Figura 5.6). Como exemplo dessa contribuição, destacamos a concentração de atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ aferida no primeiro centímetro de solo em GDR-1 ($165,5 \pm 10,43 \text{ Bq.kg}^{-1}$). Nessa amostra, a concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ foi $142,2 \pm 8,95 \text{ Bq.kg}^{-1}$, o que corresponde a 86% do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$. A partir do 24° cm, os valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ são reduzidos, equalizando o $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ ao $^{210}\text{Pb}_{\text{suportado}}$ ($26,3 \pm 3,15 \text{ Bq.kg}^{-1}$) presente no solo (Figura 5.6).

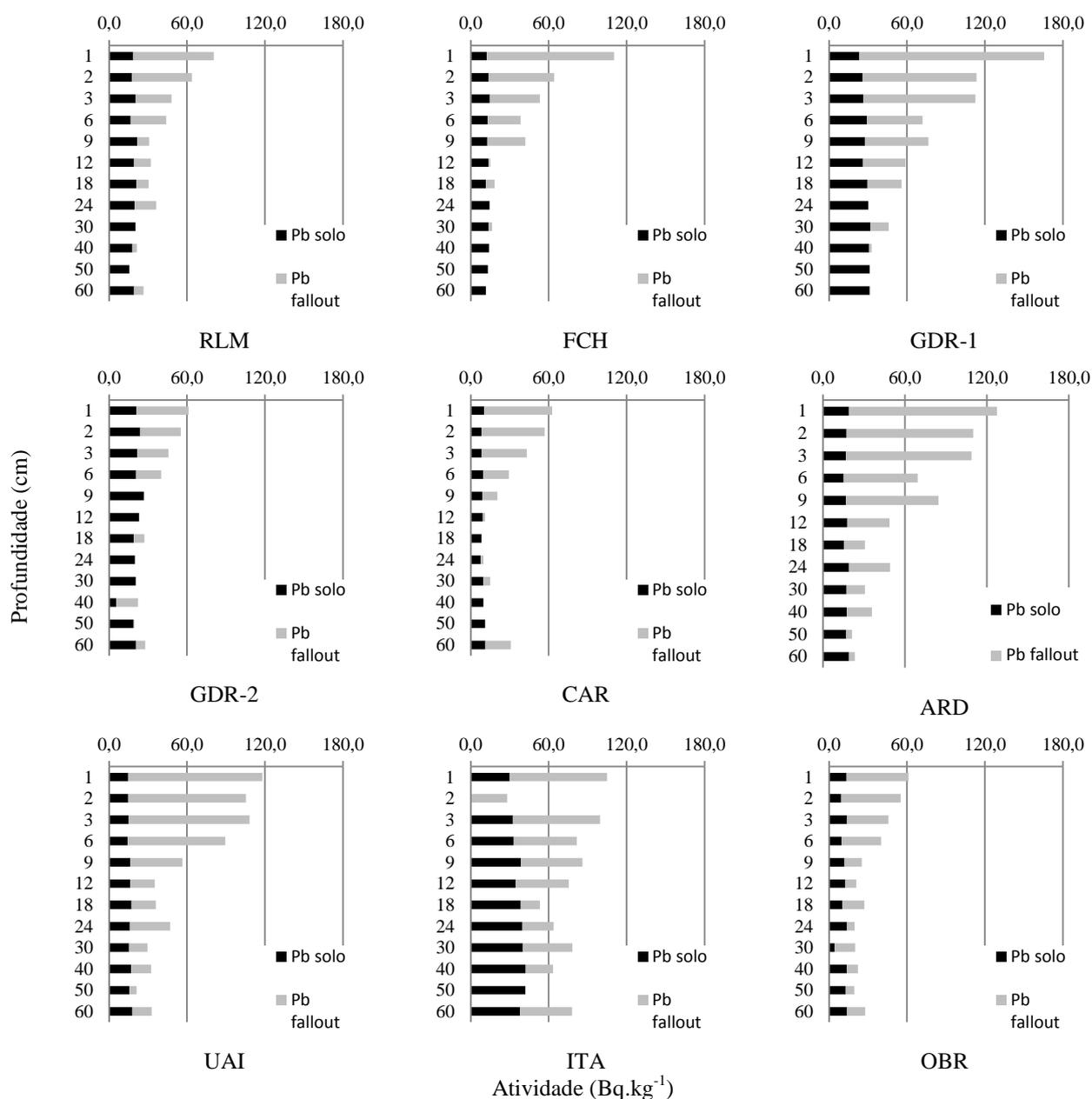


Figura 5.6 – Distribuição vertical da atividade do ^{210}Pb nos cambissolos das UC distribuídas no QF. A parte escura das barras indicam o ^{210}Pb suportado, enquanto a parte clara indica o ^{210}Pb precipitado.

Os resultados da ANOVA (Tabela 5.4) mostraram diferenças estatísticas significativas em relação à concentração de atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ mediante a profundidade das amostras ($N=12$, $df = 11$, $F = 4,75$ e $p = 0,000008$). O teste de Tukey indicou para todas as amostras que a concentração de atividade no primeiro centímetro de solo foi diferente da concentração obtida nas profundidades entre 12-60 cm. Este resultado novamente evidencia a influência do $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ nas amostras superficiais (0-12 cm). Essa influência é corroborada pela análise da ANOVA realizada para verificar a relação da concentração de atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ mediante a profundidade das amostras, a qual também apresentou diferenças estatísticas significativas ($N=12$, $df = 11$, $F = 12,1062$ e $p = 0,000000$). Nessa análise, o

teste de Tukey ainda indicou, para todas as amostras, que a concentração da atividade no 1º centímetro de solo foi diferente da concentração observada a partir do 6º centímetro, e que a concentração da atividade de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ no 2º e 3º centímetros foram diferentes da concentração obtida nas profundidades entre 12-60 cm. Por fim, os resultados da ANOVA não mostraram diferenças estatísticas significativas em relação à concentração da atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{suportado}}$ entre as profundidades amostradas ($N=12$, $df = 11$, $F = 0,0780$ e $p = 0,9997$), evidenciando seu caráter geogênico.

Tabela 5.4 – Média das concentrações de atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ nas Unidades de Conservação (UC) em função da profundidade amostrada (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si)

Prof. (cm)	Média $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ (Bq.kg ⁻¹)	Média $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq.kg ⁻¹)	Média $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ (Bq.kg ⁻¹)
1	99,07 ^a	80,97 ^a	18,1
2	69,67 ^{ab}	51,70 ^a	18,0
3	73,83 ^{abc}	54,94 ^{ab}	18,9
6	56,01 ^{bcd}	38,06 ^{bc}	17,9
9	49,75 ^{bcd}	29,61 ^{bcd}	20,1
12	35,41 ^{bd}	16,22 ^{cd}	19,2
18	31,77 ^d	12,79 ^{cd}	19,0
24	30,77 ^d	10,68 ^{cd}	20,1
30	29,83 ^d	10,54 ^{cd}	19,3
40	27,39 ^d	8,65 ^{cd}	18,7
50	20,64 ^d	0,94 ^d	19,7
60	31,45 ^d	11,11 ^{cd}	20,3

Embora a literatura que trata das concentrações de atividades de ^{210}Pb apresente valores multiformes em função da produção e vias de distribuição deste radionuclídeo, existe uma média latitudinal que compreende alguns resultados nacionais, que foram utilizados para aferir os resultados obtidos com este trabalho. Forte (1996) verificou concentração das atividades de ^{210}Pb , variando entre 20-110 Bq.kg⁻¹ em quatro amostragens de sedimentos no Rio de Janeiro (RJ), cujas profundidades de coleta foram 40 e 100 cm. Por sua vez, Godoy *et al.* (1998) verificaram concentrações das atividades de ^{210}Pb , variando entre 30-95 Bq.kg⁻¹ em três amostragens de sedimentos de lagos da bacia Pantaneira (MT), cujas profundidades de coleta variaram entre 40-60 cm. Oliveira (2006), ao analisar três perfis de 60 cm de profundidade, em solos não perturbados no município de São Paulo/SP, registrou concentração das atividades de ^{210}Pb entre 29±2 Bq.kg⁻¹ e 48±2 Bq.kg⁻¹. Saito *et al.* (2001) registraram valores entre 13 e 122 Bq.kg⁻¹ em sedimentos nos estado de São Paulo; Humphries *et al.* (2010) diagnosticaram valores entre 3 e 50 Bq.kg⁻¹ em sedimentos no sul do continente africano, valores que condizem com as médias brasileiras. As concentrações detalhadas destes trabalhos estão

apresentadas na Tabela 5.5, onde também se encontram valores de ^{210}Pb medidos por Silva *et al.* (2018), porém em uma região com altas concentrações naturais de ^{238}U no solo, portanto não utilizada nas comparações com os demais resultados, mas útil como referência nacional.

Considerando a variação média entre 25-90 Bq.kg^{-1} , que engloba a maior parte dos valores apresentados por estes pesquisadores, exceto Silva *et al.* (2018), as concentrações de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ nos cambissolos estudados, apresentam uma média consensual ($46,30 \pm 7,02 \text{ Bq.kg}^{-1}$ – desvio padrão $32,42 \text{ Bq.kg}^{-1}$).

Tabela 5.5 – Relação de concentrações atividades de ^{210}Pb no Brasil e em uma região na África do Sul

Autor	Ano	Concentração da atividade (Bq.kg^{-1})	\pm (Bq.kg)	Latitude (S)	Informações
Silva <i>et al.</i>	2018	7 a 5098		7°30'	Solo. Pocinhos (PE)
		45 a 80		18°24'	P1.Sedimentos de lago (MT). 0-60 cm/
Godoy	1998	30 a 70		18°24'	P2. Sedimentos de lago (MT). 0-50 cm/
		45 a 80		18°21'	P3. Sedimentos de lago (MT). 0-40 cm/
		55 a 95		18°21'	P4. Sedimentos de lago (MT). 0-60 cm/.
Forte	1996	20 a 80		22°55'	P1.Sedimentos na bacia de Sepetiba (RJ). 0-40 cm
		40 a 90		22°55'	P2.Sedimentos na bacia de Sepetiba (RJ). 0-80 cm
		25 a 70		22°57'	P3.Sedimentos na bacia de Sepetiba (RJ) 0-70 cm
		60 a 110		22°58'	P4.Sedimentos na bacia de Sepetiba (RJ) 0-100 cm
Oliveira	2006	32- 41	2	23°38'	P1. Solo não perturbado. 0-60cm
		40 – 48	2	a	P2. Solo não perturbado. 0-60cm
		29- 35	2	23°40'	P3. Solo não perturbado. 0-60cm
Saito	2010	13-122		25°00'	Sedimentos. Cananeia (SP)
Humphries <i>et al.</i>	2010	3-38		27°39'	Sedimento. África do Sul. 0-90 cm
		3-50		27°41'	Sedimento. África do Sul. 0-90 cm

As concentrações das atividades registradas acima de 95 Bq.kg^{-1} foram verificadas apenas nos três primeiros centímetros em GRD-1, ARD, UAI e ITA e no 1° cm de FCH. As concentrações registradas abaixo de 25 Bq.kg^{-1} foram registradas, principalmente, a partir do 12° cm em CAR, OBR, GRD-2 e FCH.

Assim como ocorreu com o ^{137}Cs , as concentrações das atividades diagnosticadas refletiram os inventários de estoques de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, constituído pelo ^{210}Pb suportado ($^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$) somado ao ^{210}Pb em excesso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$). O estoque médio de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, nos 60 cm de solo, foi de $29.393,73 \pm 476,99 \text{ Bq.m}^{-2}$ com um desvio padrão de $\pm 12.319,54 \text{ Bq.m}^{-2}$ (Tabela 5.6). Os maiores estoques de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ ocorreram nas amostras ITA ($55.366,08 \pm 589,39 \text{ Bq.m}^{-2}$) e GDR-1 ($42.473,67 \pm 604 \text{ Bq.m}^{-2}$), enquanto os

menores estoques foram registrados em CAR ($15.465,44 \pm 189,66 \text{Bq.m}^{-2}$) e FCH ($17.618,84,53 \pm 277,7 \text{Bq.m}^{-2}$). Por sua vez, os maiores estoques de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ocorreram em ITA ($22.977,15 \pm 241,31 \text{Bq.m}^{-2}$) e em ARD ($18.064,77 \pm 395,22 \text{Bq.m}^{-2}$), e os menores estoques foram registrados em FCH ($4395,3 \pm 13,36 \text{Bq.m}^{-2}$ – Tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Inventário de ^{210}Pb e representação da diferença estatística obtida pela ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$) (letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si)

Amostra	Latitude (S)		Inventário (Bq.m^{-2})		
			$^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$	$^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$
GDR-1	20°01'	43°39'	$42473,67 \pm 604,79\text{abc}$	$13218,67 \pm 129,33\text{ab}$	$29254,1 \pm 604,79\text{bc}$
RLM	20°03'	44°03'	$22165,14 \pm 547,40\text{b}$	$6795,14 \pm 134,72\text{a}$	$15370 \pm 547,39\text{abc}$
FCH	20°04'	43°57'	$17618,84 \pm 277,70\text{ac}$	$4395,30 \pm 13,36\text{a}$	$13223,53 \pm 277,69\text{ab}$
GDR-2	20°05'	43°42'	$23068,26 \pm 330,28\text{ac}$	$6777,81 \pm 87,84\text{a}$	$16290,46 \pm 330,27\text{abc}$
CAR	20°06'	43°28'	$16465,44 \pm 189,66\text{ac}$	$7039,54 \pm 60,95\text{a}$	$9425,9 \pm 189,65\text{a}$
ARD	20°16'	43°53'	$31793,73 \pm 807,19\text{abc}$	$18064,77 \pm 395,22\text{ab}$	$13728,97 \pm 807,18\text{ab}$
UAI	20°16'	43°33'	$32526,41 \pm 600,00\text{abc}$	$19361,16 \pm 309,65\text{ab}$	$13165,24 \pm 600\text{ab}$
ITA	20°27'	43°28'	$56366,05 \pm 589,39\text{abc}$	$22977,15 \pm 241,31\text{b}$	$33388,89 \pm 589,39\text{c}$
OBR	20°30'	43°39'	$22064,16 \pm 346,55\text{ac}$	$11818,93 \pm 184,10\text{ab}$	$10245,23 \pm 346,54\text{a}$
Média			$29393,52 \pm 476,99$	$11818,93 \pm 169,97$	$17121,47 \pm 66,44$

Alguns trabalhos clássicos assumem haver menor *fallout* do ^{210}Pb no hemisfério sul (Lambert & Nezami, 1965, Turekian *et al.*, 1977) e citam que a deposição seca possui incertezas em seu cálculo em função de sua associação com a vegetação e com o clima regional. Os modelos atuais mostram uma tendência inversamente proporcional de concentração de deposição de ^{210}Pb em função da latitudes, notoriamente no hemisfério sul, porém, destacam as incertezas significativas nas distribuições do radionuclídeo atmosférico principalmente na latitude compreendida entre 20 e 30° S, fato que pode estar relacionado com a escassez de dados primários nesta região (Baskaran, 2011; Persson, 2014, 2016). Essa tendência não se aplica no âmbito do QF, onde existem UC com inventários demonstrando altos estoques do radionuclídeo ao sul e baixos ao norte, o que parece apontar para uma relação do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ com outras variáveis.

Ao comparar os inventários de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ entre os solos das UC, a ANOVA mostrou uma diferença significativa ($N=9$, $df = 8$, $F = 3,63$ e $p = 0,0009$). Pelo teste de Tukey, OBR, CAR, FCH e GDR-2 se mostraram semelhantes entre si, porém, significativamente diferentes de RLM (Tabela 5.6 e Figura 5.7a). As demais UC não apresentaram diferenças significativas entre si ou com essas unidades. Ao se comparar a atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ entre os solos das UC, a ANOVA mostrou uma diferença significativa ($N=9$, $df = 8$, $F = 3,887$ e $p = 0,000505$). Pelo teste de Tukey, ITA diferiu estatisticamente de CAR, RLM, FCH e GDR-2, e se mostrou semelhante às demais UC, que foram semelhantes entre si (Tabela 5.6 e Figura 5.7b). Por fim, ao se comparar a atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ entre as

UC, a ANOVA também mostrou uma diferença significativa ($N=9$, $df = 8$, $F = 4,1698$ e $p = 0,00025$). O teste de Tukey, indicou que ITA é estatisticamente semelhante à RLM, GDR-2 e GDR-1. Este último, GDR-1, é semelhante aos dois anteriores (RLM e GDR-2), porém, diferente dos demais (Tabela 5.6 e Figura 5.7c).

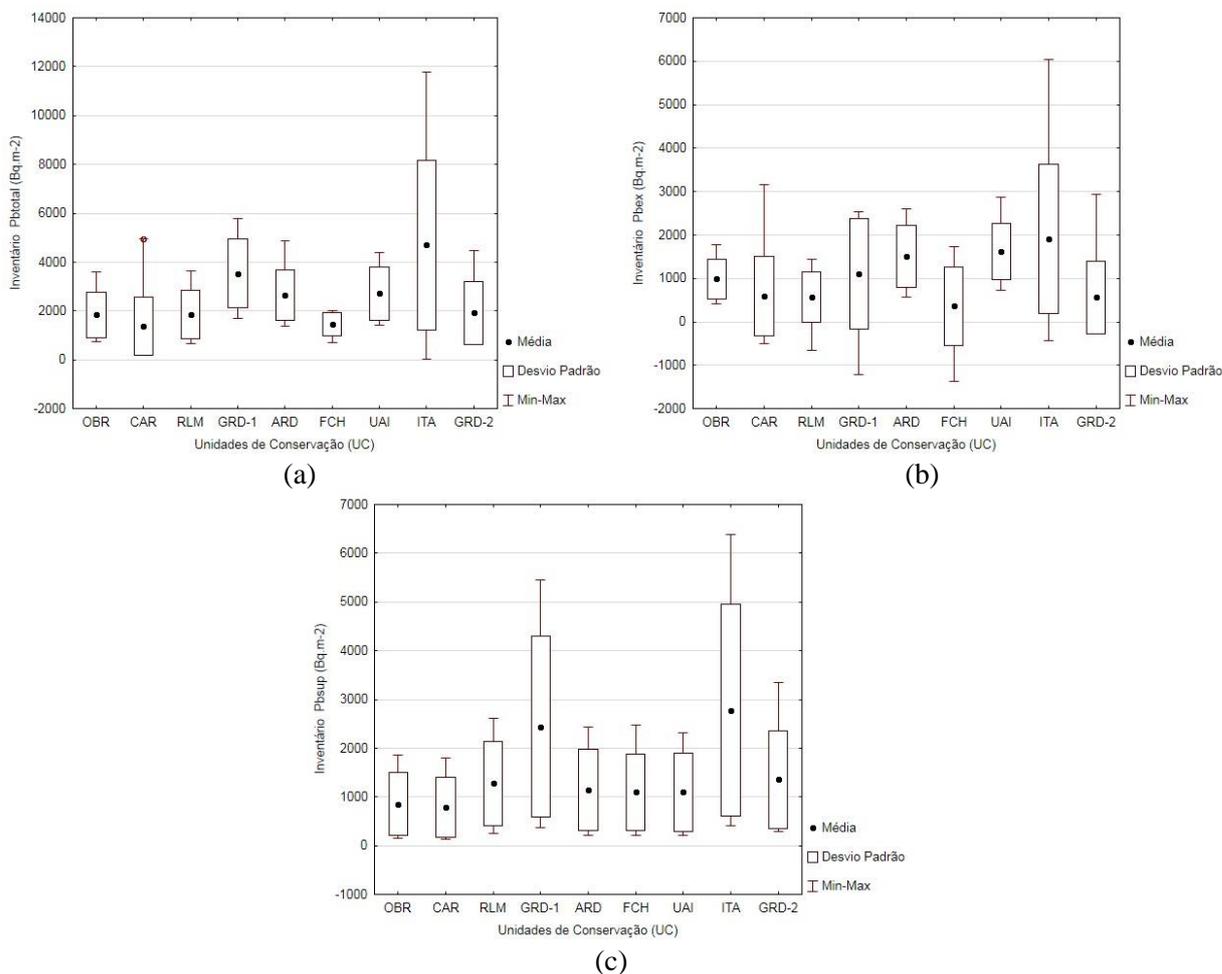


Figura 5.7 – Distribuição entre as UC de: (a) $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, (b) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ e (c) $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$.

Assim como ocorreu com ^{137}Cs , os inventários de ^{210}Pb apresentaram uma correlação positiva significativa com os estoques de COT ($r=0,719$, $p = 0,000$), que pode ser observada nos gráficos da Figura 5.8. Estes dados confirmam os indicadores apresentados por Moore & Dymondt (1988) e Walling & He, (1999), que os levaram a afirmar que ao ser depositado no solo, o $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ é rapidamente adsorvido pelos argilominerais e pela matéria orgânica.

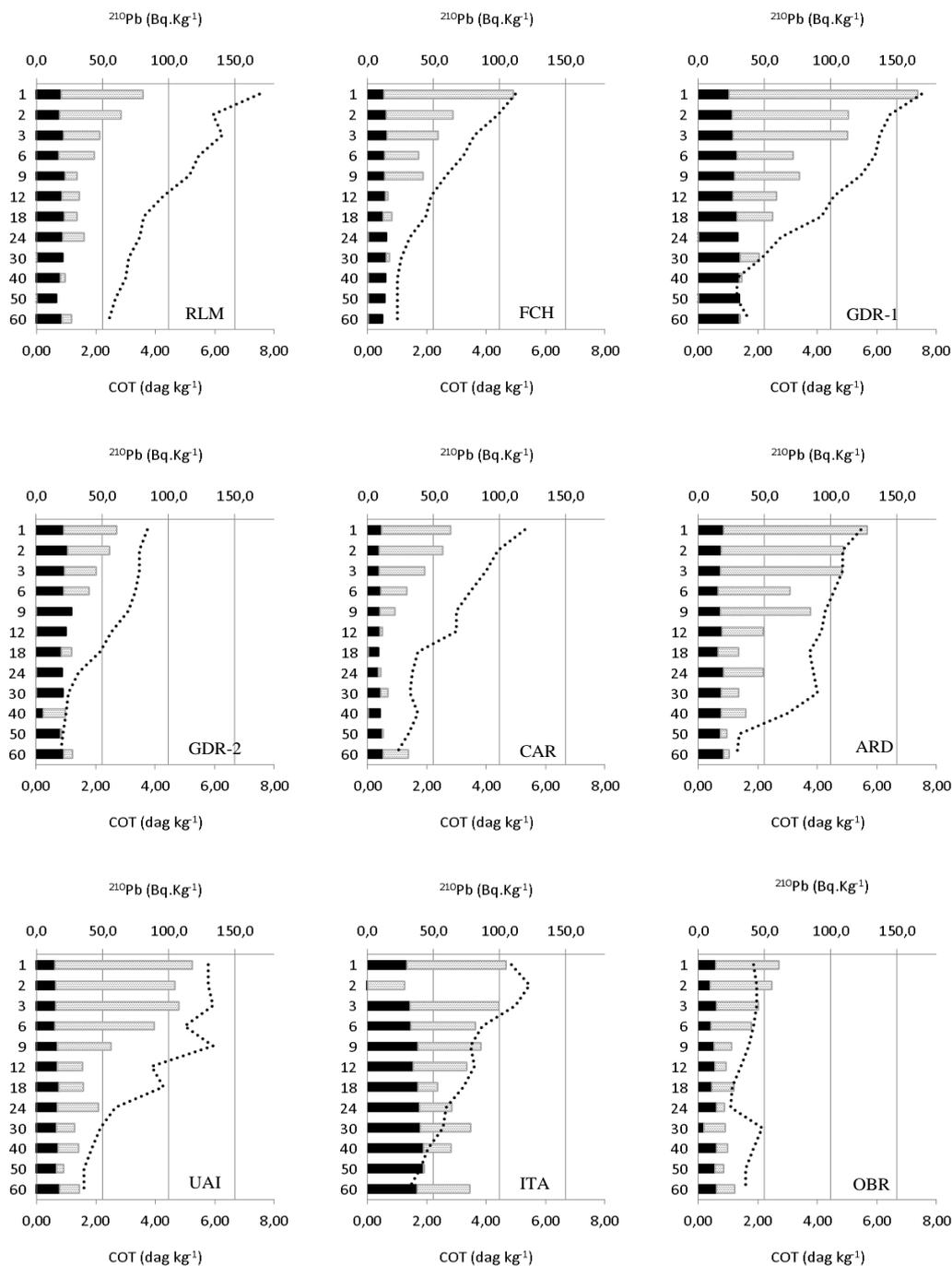


Figura 5.8 – Relação entre a atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq.kg^{-1}) indicada pelas barras cinzas, O $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ (Bq.kg^{-1}) indicado pelas barras negras, e o Carbono Orgânico Total (COT - dag.kg^{-1}), indicado pela linha pontilhada, ao longo dos 60 cm de profundidade.

Os teores de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ e de COT demonstraram uma correlação positiva significativa ($r = 0,719$, $p = 0,000$ – Figura 5.9 e Tabela 5.7). Apenas ITA e OBR não apresentaram correlações significativas de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ e de COT. Os teores de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ e de COT também demonstraram uma

correlação positiva significativa ($r = 0,7149$, $p = 0,000$ – Tabela 5.7). Semelhante ao ocorrido com $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, apenas ITA e OBR não apresentaram correlações significativas de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ e de COT. Por sua vez, os teores de $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ e de COT não demonstraram uma correlação positiva significativa ($r = 0,152$, $p = 0,117$ – Tabela 5.7) e, apesar de não significativas, apresentam correlações negativas quando analisadas em separado pelas unidades. No caminho contrário do observado com $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ e $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, ITA apresentou correlações significativas de $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ e de COT, e, GRD-1 também apresentou correlações significativas de $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ com COT. Notoriamente, estas duas UC possuem teores mais altos de $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$, cuja formação é geogênica.

Teramage *et al.* (2013), que examinaram a relação entre COT e os radionuclídeos $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ e ^{137}Cs em solos não perturbados no Japão, perceberam uma forte correlação entre essas variáveis, ($r = 0,93-0,97$, $p < 0,01$) e ($r = 0,5$ a $0,93$, $p < 0,01$), respectivamente. Os pesquisadores atribuem as correlações ao *fallout* destes radionuclídeos, uma vez que a deposição se dá na faixa de maior ocorrência de COT, a camada superficial do solo, e a baixa absorção destes radionuclídeos pela vegetação. Além disso, verificaram uma melhor relação do COT com o $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, que possui estoques mais altos que o ^{137}Cs , principalmente, nos primeiros centímetros do solo em função de sua precipitação constante ao longo do tempo. Essas observações ajudam a explicar as baixas correlações entre o COT e o $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$, cuja formação é geogênica, e, também, o fato das amostras coletadas em ITA e GDR-1 possuírem correlações significativas entre o COT e o $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$, uma vez que estas possuem os maiores estoques desta fração do chumbo, se comparadas às outras UC (Figura 5.8 e Figura 5.9).

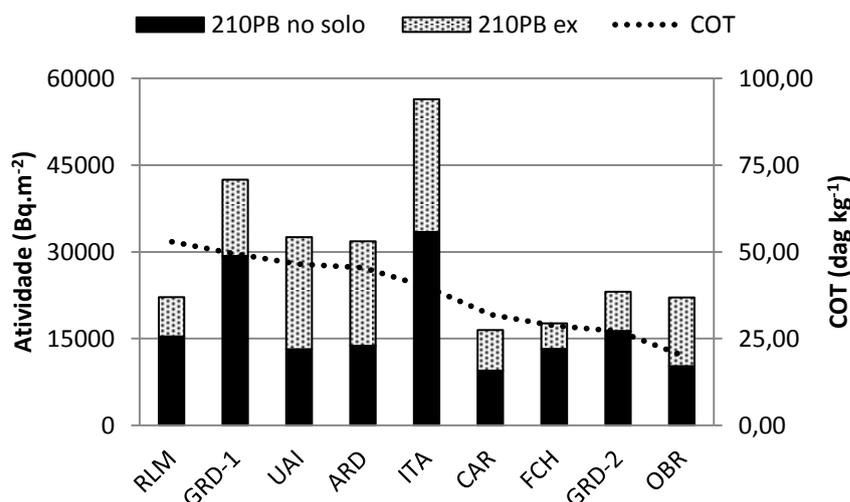


Figura 5.9 – Relação entre os estoques de COT e de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ entre as Unidades de Conservação.

Tabela 5.7 – Resultados das correlações entre COT e o ^{210}Pb

UC	²¹⁰ Pb _{total}		²¹⁰ Pb _{ex}		²¹⁰ Pb _{sup}	
	correlações	covariâncias	correlações	covariâncias	correlações	covariâncias
OBR	r = 0,440, p = 0,152	2,115	r = 0,513, p = 0,088	2,483	r = -0,401, p = 0,197	-0,37
CAR	r = 0,820, p = 0,001	22,661	r = 0,833, p = 0,001	22,97	r = -0,195, p = 0,543	-0,3
RLM	r = 0,897, p = 0,000	29,098	r = 0,882, p = 0,000	28,913	r = -0,066, p = 0,838	0,198
GDR-1	r = 0,897, p = 0,000	87,12	r = 0,902, p = 0,000	92,532	r = -0,897, p = 0,000	-0,538
ARD	r = 0,801, p = 0,002	39,07	r = 0,808, p = 0,001	39,308	r = -0,141, p = 0,662	-0,242
FCH	r = 0,942, p = 0,000	40,591	r = 0,940, p = 0,000	40,62	r = -0,020, p = 0,951	-0,029
UAI	r = 0,829, p = 0,001	53,23	r = 0,827, p = 0,001	54,273	r = -0,532, p = 0,075	-1,086
ITA	r = 0,010, p = 0,974	0,375	r = 0,145, p = 0,653	5,39	r = -0,880, p = 0,000	-5,003
GDR-2	r = 0,788, p = 0,002	13,417	r = 0,628, p = 0,029	10,346	r = -0,522, p = 0,082	3,081

A associação do ²¹⁰Pb com as argilas é relatada em diversos trabalhos (Chanton *et al.*, 1983; Carvalho, 1995; Oliveira, 2006; Gaspar *et al.*, 2013); porém, apesar de não terem sido encontradas correlações significativas entre os percentuais de argila e o ²¹⁰Pb, todas as covariâncias foram positivas (²¹⁰Pb_{total}, ²¹⁰Pb_{ex}, ²¹⁰Pb_{sup}) o que indica que há uma relação positiva entre estas variáveis (Tabela 5.8). Vale destacar também que, apesar das correlações entre o percentual de argila e os valores de ²¹⁰Pb_{total} e ²¹⁰Pb_{ex} apresentarem valores baixos, estas foram significativas (Tabela 5.8 e Figura 5.10).

Tabela 5.8 – Resultados das correlações e covariâncias do ²¹⁰Pb e a granulometria

(continua)

	²¹⁰ Pb _{total}				
	Areia total	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
Correlação	r = 0,145, p=0,113	r = -0,385, p=0,000	r = 0,437, p=0,000	r = -0,027, p=0,783	r = 0,358, p=0,000
Covariância	-83,945	-261,5	188,853	-10,95	92,718

Tabela 5.8 – Resultados das correlações e covariâncias do ^{210}Pb e a granulometria

(conclusão)

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$					
	Areia total	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
Correlação	$r = 0,108,$ $p=0,264$	$r = -0,302,$ $p=0,002$	$r = 0,350,$ $p=0,000$	$r = -0,065,$ $p=0,502$	$r = 0,343,$ $p=0,000$
Covariância	-59,434	-194,877	143,598	-25,356	84,403
$^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$					
	Areia total	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila
Correlação	$r = 0,161,$ $p=0,097$	$r = -0,370,$ $p=0,000$	$r = 0,395,$ $p=0,000$	$r = -0,133,$ $p=0,170$	$r = 0,122,$ $p=0,210$
Covariância	-24,578	-66,7	45,266	14,431	8,354

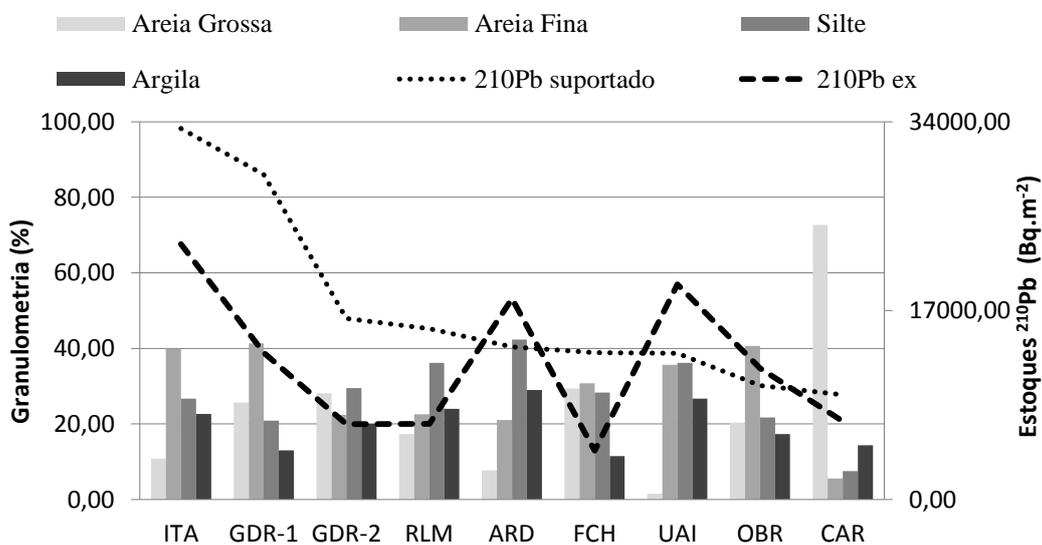


Figura 5.10 – Relação entre os estoques de ^{210}Pb e a média granulométrica de cada Unidade de Conservação.

5.3 – ^{238}U

A concentração da atividade do ^{238}U é semelhante à concentração do $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$, uma vez que os dois radionuclídeos foram calculados a partir da emissão gama do ^{226}Ra . Assim, tal como para $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$, as concentrações de ^{238}U não variaram significativamente entre as profundidades amostradas (Figura 5.11 e Tabela 5.9), como confirmado pela da ANOVA ($N=12, df = 11, F = 0,0780$ e $p = 0,999$).

Resultado esperado, uma vez que o radionuclídeo possui formação exclusivamente geogênica e está associado à matriz do solo. A média geral das concentrações de atividades entre as profundidades estudadas foi de $19,1 \pm 0,99 \text{ Bq.kg}^{-1}$, com desvio padrão de $8,59 \text{ Bq.kg}^{-1}$. As médias mais altas foram verificadas em ITA ($36,65 \pm 0,91 \text{ Bq.kg}^{-1}$) e em GDR-1 ($28,65 \pm 0,8 \text{ Bq.kg}^{-1}$), cujo incremento se deu no sentido do fundo do perfil, podendo estar relacionado com a concentração de ^{238}U da rocha matriz (Silva, 2018).

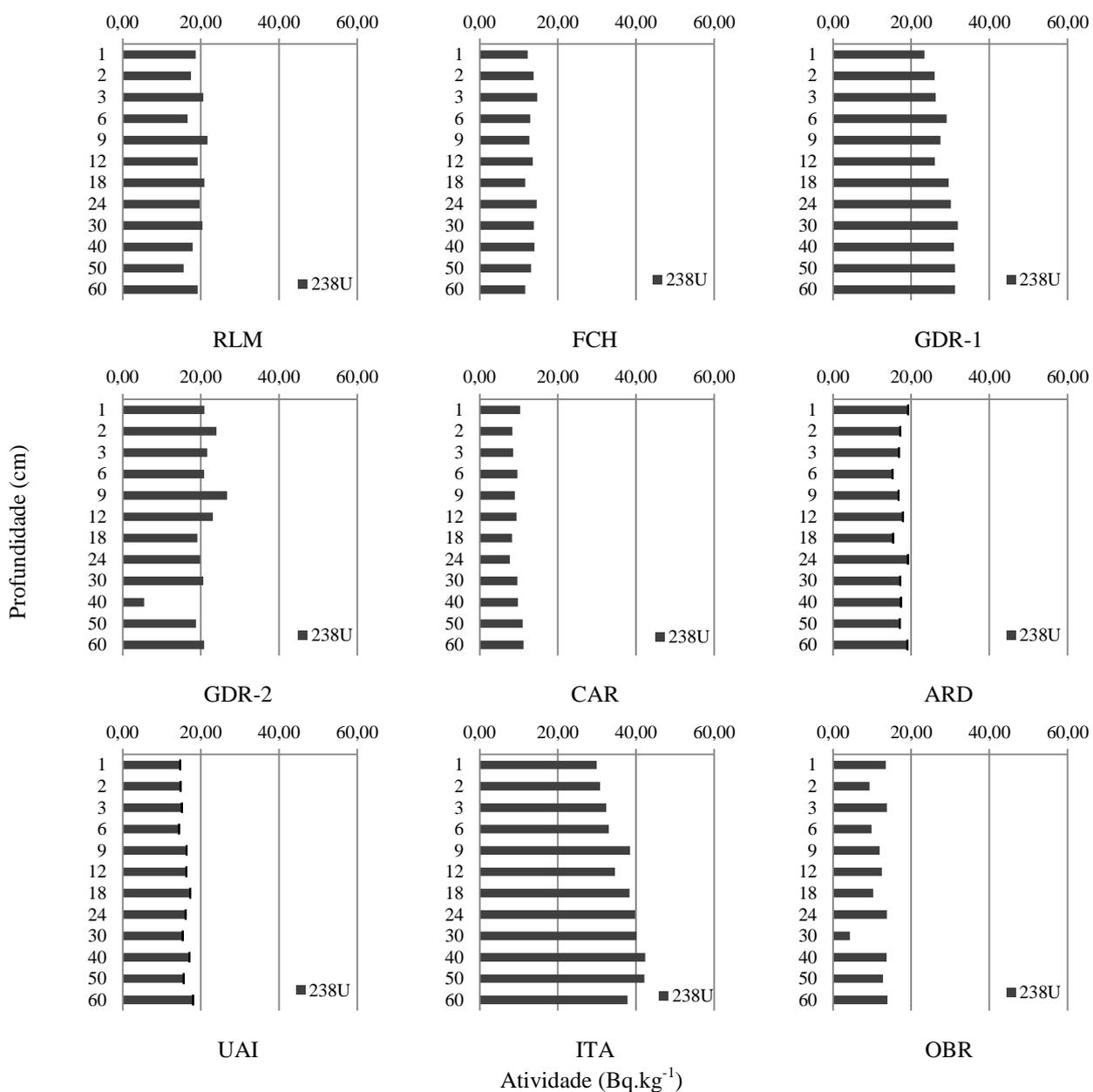


Figura 5.11 – Distribuição da Atividade do ^{238}U e incerteza analítica, em função da profundidade das amostras de solos. As variações representadas no gráfico indicam a incerteza obtida no equipamento de leitura.

Tabela 5.9 – Médias de concentração de atividade do ^{238}U por profundidade amostrada. Não houve diferenças significantes entre as médias

(continua)

Profundidade (cm)	Média (Bq.kg ⁻¹)	Desvio padrão (Bq.kg ⁻¹)
0-1	18,1	6,2
1-2	18,0	7,6
2-3	18,9	7,2

Tabela 5.9 – Médias de concentração de atividade do ^{238}U por profundidade amostrada. Não houve diferenças significantes entre as médias

(conclusão)

Profundidade (cm)	Média (Bq.kg ⁻¹)	Desvio padrão (Bq.kg ⁻¹)
3-6	17,9	8,2
6-9	20,1	9,4
9-12	19,2	7,8
12-18	19,0	9,7
18-24	20,1	9,5
24-30	19,3	11,0
30-40	18,7	11,3
40-50	19,7	10,3
50-60	20,3	8,9

Alguns trabalhos apresentam concentrações de atividades de ^{226}Ra e de seu precursor ^{238}U próximas das médias encontradas no QF (Tabela 5.10), considerando-se que se tratam de solos desenvolvidos sobre rochas metassedimentares.

Tabela 5.10 – Médias de concentração de atividade do ^{238}U por profundidade amostrada. Não houve diferenças significantes entre as médias

Trabalho	Ano	Concentração da atividade (Bq.kg ⁻¹)	Local	Prof. (cm)	Litologia e outras informações
Silva <i>et al.</i>	2018	0,3-118	Pocinhos/PB	05-025	Rochas Graníticas
Malanca <i>et al.</i>	1993	9,7-48,7	RN	30	Rochas Igneas Graníticas
Pereira & Júnior	2002	59,4-61	Caetitê/BA		Rochas Metamórficas
Ramli <i>et al.</i>	2005	58,8-484,0	Malásia	5	Rochas Vulcânicas Básicas
Al-Jundi <i>et al.</i>	2003	28,7-84,0	Jordânia	0-15	
Paiva	2008	12,3-61,7			Teores Típicos
UNSCEAR	1988/2000	25-40			Teores Típicos
Este trabalho	2019	4,3-42,3	QF/MG	0-60	Rochas Metamórficas

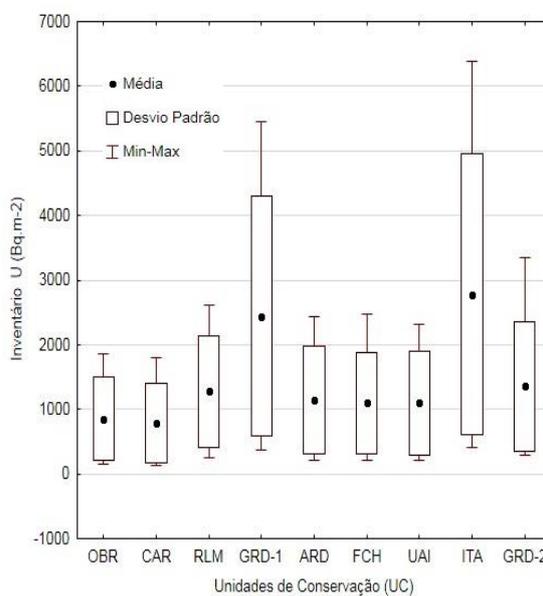
Assim como nos demais radionuclídeos, as concentrações de atividade diagnosticadas refletiram os inventários de estoques de ^{238}U , cuja média foi $17121,48 \pm 63,44 \text{ Bq.m}^{-2}$, com um desvio padrão de $7919,55 \text{ Bq.m}^{-2}$ (Figura 5.12a), para os solos das UC. Destaca-se que a atividade de ^{238}U não cessa nos 60 centímetros de solo amostrados, então, a quantificação dos estoques deste elemento

representa seu inventário apenas até essa profundidade. Como dito, as atividades diagnosticadas refletem nos inventários, assim, as áreas amostrais ITA e GRD-1 registraram os maiores estoques, $33.388,9 \pm 68,28 \text{ Bq.m}^{-2}$ e $29.255,1 \pm 65,16 \text{ Bq.m}^{-2}$ respectivamente, enquanto em CAR e OBR foram registrados os menores estoques $9.425,9 \pm 47,19 \text{ Bq.m}^{-2}$ e $10.245,1 \pm 74,99 \text{ Bq.m}^{-2}$.

Entre as Unidades de Conservação (UC) houve diferença estatística significativa quanto à atividade do ^{238}U nos solos (ANOVA $N=9$, $df = 8$, $F = 116,44$ e $p = 0,0000$). O teste de Tukey mostrou que OBR não apresentou diferença significativa de CAR e FCH; que RLM não se diferenciou de ARD; que UAI também não apresentou diferença com GRD-2, que ARD não foi diferente de UAI e GRD-2, e, por fim, FCH não apresentou diferença estatística de UAI (Figura 5.12b).

Amostra	Inventário de ^{238}U (Bq.m^{-2})*	Lat (S)	Correlação o COT x ^{238}U
GDR-1	$29255,1 \pm 65,16^{abc}$	20°01'	$r = 0,956$, $p = 0,000$
RLM	$15370,0 \pm 60,64^b$	20°03'	$r = 0,927$, $p = 0,000$
FCH	$13223,6 \pm 51,30^{ad}$	20°04'	$r = 0,746$, $p = 0,005$
GDR-2	$16290,6 \pm 86,01^{bc}$	20°05'	$r = 0,873$, $p = 0,000$
CAR	$9425,9 \pm 47,19^a$	20°06'	$r = 0,906$, $p = 0,000$
ARD	$13728,9 \pm 71,25^{bc}$	20°16'	$r = 0,927$, $p = 0,000$
UAI	$13165,2 \pm 46,15^{cd}$	20°16'	$r = 0,879$, $p = 0,000$
ITA	$33388,9 \pm 768,28^{abc}$	20°27'	$r = 0,830$, $p = 0,001$
OBR	$10245,1 \pm 74,99^a$	20°30'	$r = 0,420$, $p = 0,174$
Média	$17121,48 \pm 63,44$	-	-

(a)



(b)

Figura 5.12 – (a) Inventário de ^{238}U em solos não perturbados do QF e representação da diferença estatística obtida pela ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$), onde as letras iguais identificam médias não estatisticamente diferentes entre si; (b) Gráfico de distribuição do ^{238}U entre as UC.

A presença de COT no solo não influenciou a quantidade e a distribuição vertical do ^{238}U (Figura 5.13). Estas duas variáveis apresentaram baixa correlação positiva, não significativa ($r = 0,152$, $p = 0,117$), como dito, semelhante aos resultados apresentados para o $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ (Tabela 5.7). Entretanto, nos primeiros centímetros de alguns perfis, nas áreas de FES, foi verificada uma aparente irregularidade no comportamento do ^{238}U (Figura 5.13), que poderia ser justificada por processos de bioturbação promovidos pela presença de raízes das plantas, ou por condições locais de óxido-redução e pH do solo (Alencar, 2003; Paiva, 2008).

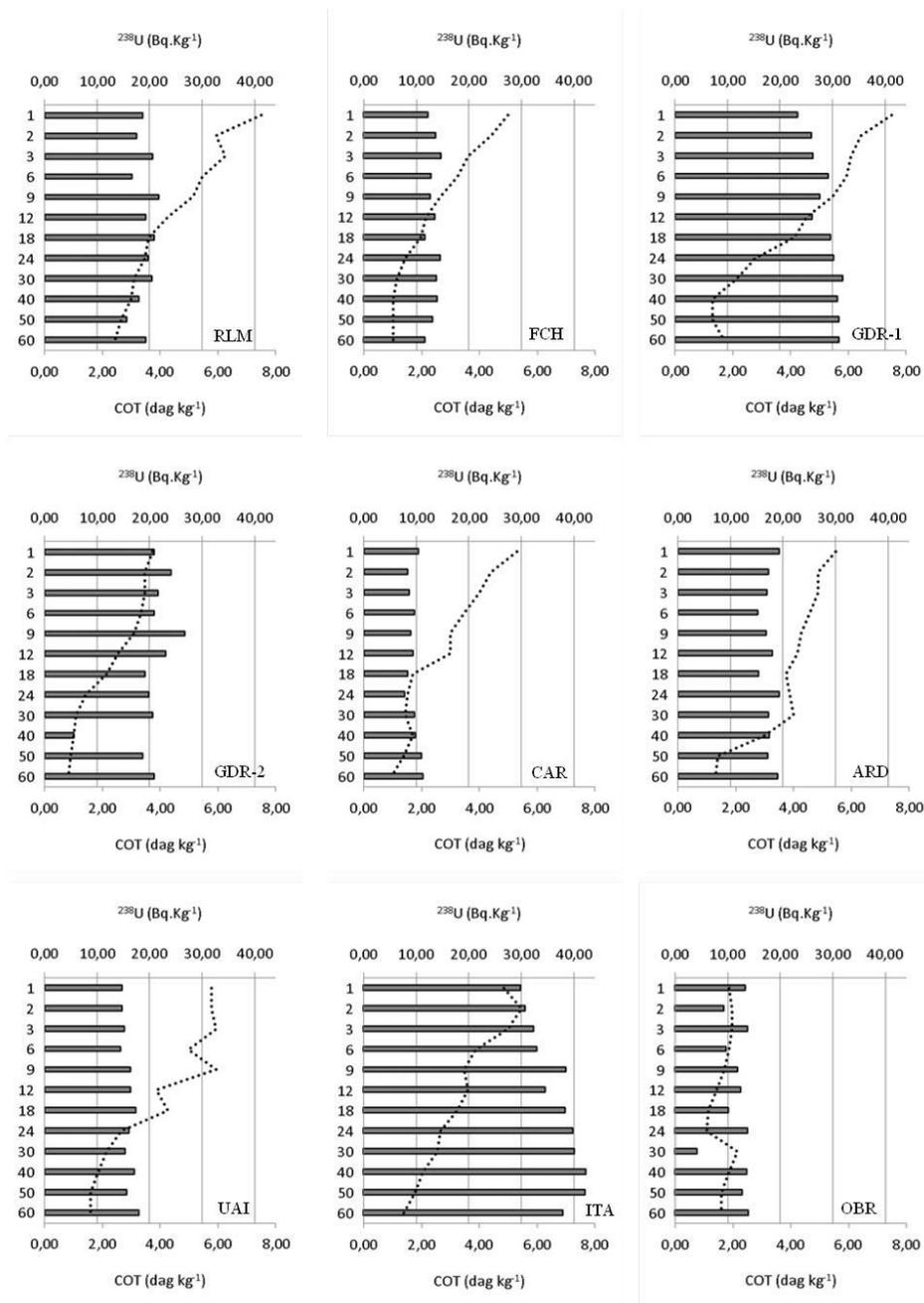


Figura 5.13 – Relação entre a atividade do ^{238}U (Bq.kg^{-1}), indicado pela barras e o Carbono Orgânico Total (COT - dag.kg^{-1}), indicado pela linha pontilhada, ao longo dos 60 cm de profundidade.

A associação do ^{238}U com as argilas é relatada em alguns trabalhos (Souza, 1998; Nascimento, 2003; Alencar, 2003; Rebello *et al.*, 2003; Bonotto, 2004; Paiva, 2008), entretanto, não foram constatadas correlações significativas entre as duas variáveis nesta pesquisa, mesmo havendo covariância positiva entre essas duas variáveis, como ocorreu com o $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ (Tabela 5.8 e Figura 5.10).

5.4 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

A PCA explicou 51,3% da variância dos dados (Figura 5.14). O eixo 1, representando 35,6% da variância explicada, selecionou os elementos Cu, Ni, Li, Sc, Y, Cr, V, Zr, Mg, Ti, K e Al. O eixo 2, com 15,7% da variância explicada, selecionou os elementos S, P, Mn e Fe.

A PCA permitiu constatar uma correlação positiva entre os radionuclídeos, tais como ^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U , o COT, e os elementos estáveis, tais como Fe, S, Mn, Ca, Co, e Pb. Uma correlação negativa entre argila, silte, Be, Li, Y, Sc, Zn, Sr, Cu, Zr, Ni, V, Ba, Cr, Mg, Na, Ti, Si, e Al, e também entre a areia, Mo, Th, As, P e K.

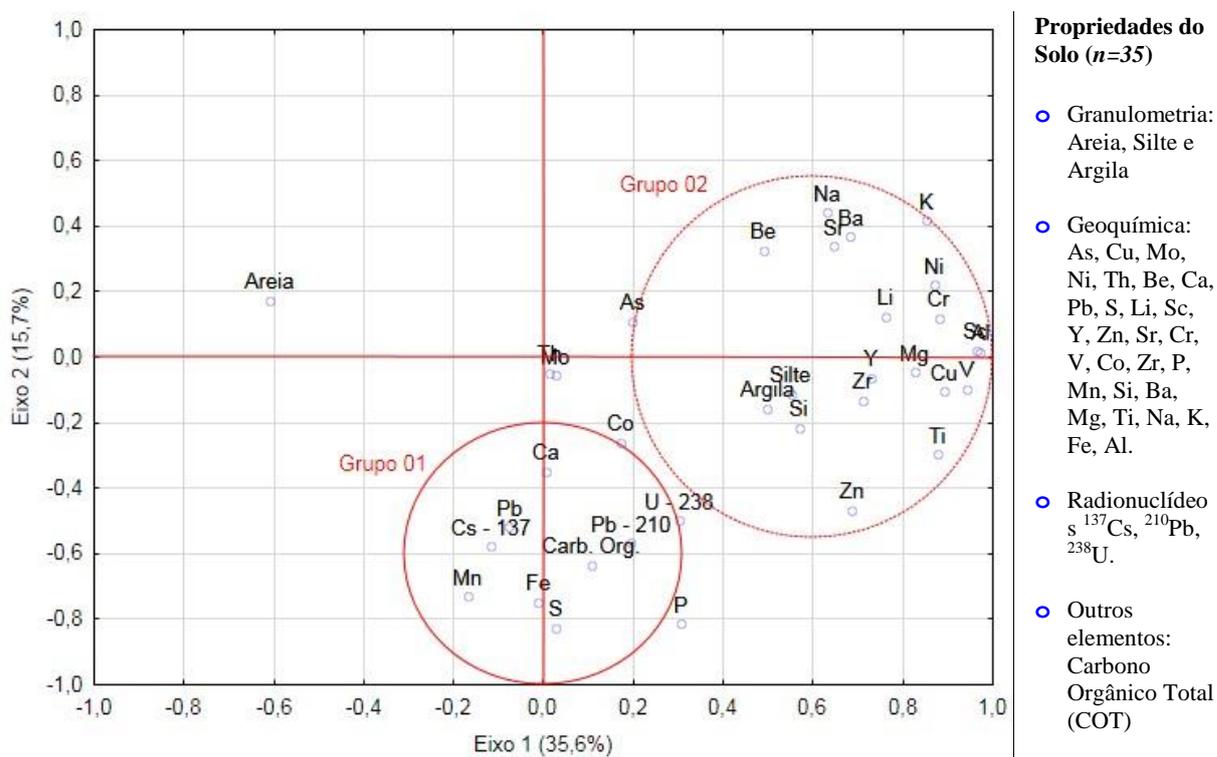


Figura 5.14 – Resultado da Análise de Componente Principal (PCA). Propriedades do Solo (n=35). Granulometria – Areia, Silte e Argila. Geoquímica – As, Cu, Mo, Ni, Th, Be, Ca, Pb, S, Li, Sc, Y, Zn, Sr, Cr, V, Co, Zr, P, Mn, Si, Ba, Mg, Ti, Na, K, Fe, Al. Radionuclídeos ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{238}U . Carbono Orgânico Total (COT).

A PCA agrupou os elementos estáveis Co, Ca, Mn, Fe e S com ^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U (Grupo 01 – Figura 5.14). Embora alguns possam ter baixa capacidade de competir por sítios de adsorção (Cornell, 1993), sob baixos teores de COT este comportamento pode ser alterado (Forte, 1996), fazendo com que os elementos tenham maior importância na adsorção dos radionuclídeos nas camadas de solo subsuperficiais.

Os valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ e $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ apresentaram correlações positivas e significativas com os resultados obtidos para o ^{137}Cs ($r = 0,695$, $p = 0,000$; $r = 0,725$, $p = 0,000$, respectivamente). No caso do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ essa correlação pode ser explicada pela influência do $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sobre o total deste radionuclídeo no solo, que, por seu turno, é oriundo de uma fase atmosférica este radionuclídeo se

precipita sobre o solo (*fallout*), semelhante ao que acontece com o ^{137}Cs . Essas correlações podem explicar o agrupamento deste radionuclídeo na PCA, e, pela mesma razão, o ^{238}U também faz parte do agrupamento, pois suas concentrações de atividade no solo são as mesmas do $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$, que junto ao $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ formam o $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Os cambissolos do Quadrilátero Ferrífero estudados neste trabalho, amostrados em diferentes Unidades de Conservação, apresentaram em seus primeiros 60cm, como característica comum, a presença predominante de horizontes Bi. No entanto, suas composições mineralógicas e geoquímicas, relictos do material litológico do qual derivam, não só permitiram agrupá-los em categorias diferentes como também influenciaram o comportamento dos radionuclídeos no solo (^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U).

A CATPCA de composições minerais e o PCA com as concentrações dos elementos estáveis das UC organizaram os cambissolos das UC em três agrupamentos distintos. O primeiro grupo, constituído por OBR e CAR, possui solos formados a partir de quartzitos e cujas composições minerais principais são QMCG e QG, respectivamente. O segundo grupo composto pelas unidades GDR-1, RLM e FCH, cujos solos são formados a partir de itabiritos e possuem como principais composições minerais os grupos QGH e QGoH, respectivamente. Já o terceiro agrupamento formado pelas unidades ARD, GRD-2, ITA e UAI que possuem solos desenvolvidos a partir de xistos e principais composições minerais QMCG, nas três primeiras UC, e, QMC em UAI. Notoriamente, as maiores concentrações de atividades dos radionuclídeos ocorreram no primeiro grupo, concentrações próximas à média geral ocorreram no segundo grupo e as menores concentrações no terceiro grupo.

Por sua vez, a PCA de variáveis quantitativas organizou os dados em dois agrupamentos: o primeiro composto pelas variáveis, COT, Ca, Co, Mn, Fe e S, correlacionadas significativamente com os radionuclídeos ^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U , que também estão correlacionados entre si; e o segundo com a maioria dos elementos estáveis, percentuais de argila e de silte. No primeiro grupo os elementos estáveis (Ca, Co, Mn, Fe e S) apresentaram concentrações mais elevadas entre as UC GDR-1, RLM e FCH, assim como os radionuclídeos, o que pode explicar o agrupamento realizado nesta PCA. Entretanto, estes elementos quando analisados separadamente não mostraram correlações significativas com os radionuclídeos, tendo menor importância na distribuição vertical dos mesmos no solo. Por sua vez, o COT e as concentrações de ^{137}Cs e de ^{210}Pb demonstraram uma forte correlação entre si (^{137}Cs - $r = 0,794$, $p = 0,000$ e ^{210}Pb - $r = 0,719$, $p = 0,000$). Por outro lado, os teores de COT não apresentaram correlação significativa com ^{238}U ($r = 0,152$, $p = 0,117$) e não influenciaram seu comportamento no solo, fato associado à formação geogênica deste radionuclídeo, que lhe confere distribuição homogênea ao longo dos perfis de solos avaliados. Mesmo assim, o COT e estes três radionuclídeos aparecem agrupados na PCA.

A distribuição vertical do ^{137}Cs , ^{210}Pb e ^{238}U nos cambissolos não perturbados do QF se mostrou coerente com resultados apresentados para outras regiões do país e do planeta, bem como a

distribuição horizontal. Os radionuclídeos depositados por *fallout*, ^{137}Cs e $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, apresentaram uma forte correlação entre si ($r = 0,725$, $p = 0,000$) e médias de estoques dentro do esperado para as latitudes da área de estudo ($^{137}\text{Cs} = 193,76 \text{ Bq.m}^{-2} \pm 3,65 \text{ Bq.m}^{-2}$ e $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = 11818,93 \pm 169,97 \text{ Bq.m}^{-2}$). Por outro lado, no âmbito do QF, foi verificada uma discordância na tendência de deposição latitudinal esperada, refletindo a influência de variáveis topográficas e climáticas desta região, na precipitação dos radionuclídeos. A média do estoque de ^{238}U ($17121,48 \pm 63,44 \text{ Bq.m}^{-2}$) também se mostrou dentro do esperado para solos desenvolvidos a partir de rochas metassedimentares.

Os resultados de distribuição vertical e horizontal dos radionuclídeos permitem confirmar o seu potencial na realização de cálculos de erosão e de sedimentação não só no QF, como também em regiões características físicas, químicas e bióticas semelhantes. As profundidades em que os estoques dos radionuclídeos de *fallout* foram verificados ($^{137}\text{Cs} = 30 \text{ cm}$, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = 24 \text{ cm}$), são também as profundidades máximas que podem ser consideradas em cálculos de erosão/sedimentação pelo método indireto de redistribuição de solo nas áreas estudadas do QF. Por sua vez, o ^{238}U , por estar presente em todo perfil do solo e pelo seu comportamento simétrico ao longo do perfil, não é indicado para cálculos indiretos de erosão, no entanto, o seu diagnóstico pode ser usado como ferramenta complementar ao ^{210}Pb em cálculos de perda de solo.

Referências

- Aieta, E. M., Singley, J. E., Trussell, A. R., Thorbjarnarson, K. W., & McGuire, M. J. 1987. Radionuclides in drinking water: an overview. *Journal- American Water Works Association*, **79**(4),): 144-152.
- Alencar, A. S. 2003. *Mapeamento da radioatividade ambiental em praias arenosas da Ilha Grande, Rio de Janeiro – Brasil*. Tese de Doutorado. UERJ / Biociências Nucleares, Rio de Janeiro. , 158p.
- Al-Jundi, J., Al-Bataina, B. A., Abu-Rukah, Y., & Shehadeh, H. M. (2003). Natural radioactivity concentrations in soil samples along the Amman Aqaba Highway, Jordan. *Radiation Measurements*, **36**(1-6),): 555-560.
- Alkmim, F. F. 1987. Modelo Depositional para a seqüência de metassedimentos da Serra de Ouro Branco, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Simpósio sobre Sistemas Depositionais no Pré-Cambriano. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo MG, *Anais*, **6**, :47-68.
- Alkmim, F. F. 1996. Geologia e Arcabouço Estrutural da Porção Norte do Platô da Moeda, Sudoeste de Belo Horizonte, MG. Belo Horizonte: Convenio MBR/COPASA. DEGEO, EM, UFOP. *Relatório Interno*, 23p.
- Alkmim, F. F., & Marshak, S. 1998. *Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. *Precambrian Research*, v **90**; : p., 29-98.
- Andrade, L. N. D. 2008. Caracterização hidrológica e hidrogeoquímica do Parque Estadual do Itacolomi – Ouro Preto/MG. Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Departamento de Geologia. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. *Contribuições às ciências da terra*, v. **61**:, n. 273p.
- Andrade, L. N. D., Leite, M. G. P., & Bacellar, L. D. A. P. 2009. Influência geológica em assinaturas químicas das águas e solos do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais. *Rem: Revista Escola de Minas*, **62**(2).
- Andrade, L. N., Leite, M. G. P., & Bacellar, L. D. A. P. 2012. Composição mineralógica e geoquímica dos solos do parque estadual do Itacolomi-Ouro Preto/MG. *Quaternary and Environmental Geosciences*, **3**(1-2).
- Andrello, A. C. 2004. *¹³⁷Cs Applicability to Soil Erosion Assessment: theoretical and empirical models*. 199p. Thesis (Ph.D. in Physics) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2004.
- Andrello, A. C., Appoloni, C. R., Araújo, E. S., Thomaz, E. L., Medeiros, P. H. A., & Macedo, I. L.. 2009. Cesium-137 Inventories In Undisturbed Areas In Different Regions Of Brazil. 2009 *International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2009*. Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Andrello, A. C., M. D. Guimaraes, M. D., C. R. Appoloni, and V. F. do Nascimento. 2003. Use of cesium-137 methodology in the evaluation of superficial erosive processes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, **46**(3):307-314.
- Andrello, A.C., C. R. Appoloni, P. S. Parreira, M. M. Coimbra, and M. F. Guimaraes. 1997. Determinação da erosão/sedimentação do solo por meio de medida da concentração de ¹³⁷Cs. CD-ROM computer file. (In Portuguese with English abstract.) *Proc. Meeting on Nuclear Applic.*, 4th. (IV ENEN). Poços de Caldas, MG, Brazil. 1997. IPEN/CNEN, SP, Brazil.
- Andrello, A.C.; Appoloni, C.R. & Nascimento Filho, V.F. 2002. Distribuição vertical de Cs-137 em solos de mata virgem da Região de Londrina (Paraná). *R. Bras. Pesq. Desenvol.*, **4**:1546-1549.
- Antunes, D. P., Sampaio, E. V. D. S. B., Ferreira Júnior, A. L. G., Galindo, I. C. L., Salcedo, I. H. 2010. Distribuição de ¹³⁷Cs em três solos representativos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v **34**, n (3).
- Antunes, P. D. 2009. *Valores de referência de ¹³⁷Cs em solos de três regiões edafoclimáticas de Pernambuco*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia. Recife. Pernambuco, Brasil. 40f.
- Babinski M., Chemale F. Jr., Van Schmus W. R. 1993. A idade das Formações Ferríferas Bandadas do Supergrupo Minas e sua Correlação com aquelas da África do Sul e Austrália. In: *Anais do II Simpósio do Cráton São Francisco*. Salvador: 152-153.

- Baioumy H. M., Khedr M. Z., Ahmed A. H. 2013. Mineralogy, geochemistry and origin of Mn in the high-Mn iron ores, Bahariya Oasis, Egypt. *Ore Geology Reviews*, **53**: 63-76.
- Baskaran, M. 2011. Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 *fallout*: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*, **102**(5),): 500-513.
- Baskaran, M., & Naidu, A. S. 1995. ²¹⁰Pb-derived chronology and the fluxes of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs isotopes into continental shelf sediments, East Chukchi Sea, Alaskan Arctic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59** (21),): 4435-4448.
- Baskaran, M.; & Shaw, G. E. 2001. Residence Time of Artic Haze Aerosols Using the Concentrations and Activity Ratios of ²¹⁰Po, ²¹⁰Pb and ⁷Be. *Aerosol Science*, v. **32**, pp. : 443 – 452.
- Bertoni, J. 1949. Sistemas coletores para determinações de perdas por erosão. *Bragantia*, **9**(5-8),): 147-155.
- Bezerra D. P. 2014. *Quadrilátero Ferrífero – MG: fatores condicionantes do relevo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 148 p.
- Bojanowski, R., Radecki, Z., Campbell, M. J., Burns, K. I., & Trinkl, A. 2001. *Report on the intercomparison run for the determination of radionuclides in soils. IAEA-326 and IAEA-327 (No. IAEA-AL--100)*. International Atomic Energy Agency.
- Bonotto, D. M. 2004. Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani. UNESP, São Paulo, UNESP. 251p.
- BRASIL. 2000. Lei nº 9.985/00, que Institui o Sistema Nacional de Unidade de Conservação da Natureza.
- BRASIL. Decreto s/n, de 13 de outubro de 2014. Cria o Parque Nacional da Serra do Gandarela, localizado nos municípios de Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, Itabirito e Rio Acima, Estado de Minas Gerais. *Diário Oficial*, Brasília, DF, 26 jun. 2014. Seção 1, p. 1. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/78217498/dou-secao-1-14-10-2014-pg-1>.
- BRASIL. Portaria nº 32-N, de 30 de março de 1994. Cria a reserva Particular do Patrimônio Natural Santuário do Caraça. Estado de Minas Gerais. *Diário Oficial*, n. nº 62, Brasília, DF, 31 de março de 1994.
- Bruggenwert, M. G. M., & Kamphorst, A. 1979. Survey of experimental information on cation exchange in soil systems. In *Developments in Soil Science*, (Vol. **5**, pp. : 141-203). Elsevier. doi:10.1016/s0166-2481(08)70660-3.
- Carmo, F. F. 2010. *Importância ambiental e estado de conservação dos ecossistemas de cangas no Quadrilátero Ferrífero e proposta de áreas alvo para a investigação e proteção da biodiversidade em Minas Gerais*. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, 90p
- Carneiro, M. A. 1992. *O Complexo metamórfico do Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais): Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano*. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, 232p.
- Carvalho Filho, A., Curi, N., & Shinzato, E. 2010. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Rev. Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **45**(8),): 903-916.
- Carvalho, A. F. *et al.* 2006. Zoneamento ecológico-econômico da área de proteção ambiental cachoeira das andorinhas. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa.
- Carvalho, F. P. 1995. ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po in sediments and suspended matter in the Tagus estuary, Portugal. Local enhancement of natural levels by wastes from phosphate ore processing industry. *Sci. Total Environ.*, **159**:201-214.
- Chanton, J. P., Martens, C. S., & Kipphut, G. W. 1983. Lead-210 sediment geochronology in a changing coastal environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47**(10),): 1791-1804.
- Clayton, A. A., José, L. Stape, P. C. Sentelhas, J. L. M. G., Gerd, S. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, **22**(6),): 711–728.
- CODEMIG. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero. Base de dados na escala 1:50.000.
- Cohen, A. S. 2003. *Paleolimnology: the History and evolution of lake systems*. Oxford: Oxford University Press, 500 p.

Oliveira, D.D., 2019. Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil).

- Cornell, R. 1993. Adsorption of cesium on minerals: a review. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **171**(2),): 483-500.
- Correchel, V. 2003. *Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do "fallout" do ¹³⁷Cs*. Tese de Doutorado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.
- Correchel, V., Bacchi, O. O. S., Reichardt, K., & De Maria, I. C. 2005. Random and systematic spatial variability of ¹³⁷Cs inventories at reference sites in South-Central Brazil. *Scientia Agricola*, **62**(2),): 173-178.
- Costa, F. D. O. 2018. *Evolução morfoopedológica de vertente escarpada na alta bacia do Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Tese de Doutorado. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 171p.
- Costa, S. A. D. 2003. *Caracterização Química, Física, Mineralógica e Classificação de Solos Ricos em Ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Tese de Doutorado, 63 p.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2007a. *Excursão virtual pela estrada real no quadrilátero ferrífero: aspectos geológicos, históricos e turísticos*. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/estrada_real/. Acesso em: novembro de 2018.
- Cross, A. F.; Schlesinger, W. H. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, **v.64**, : p.197-214, 1995.
- Debertin, K.; Helmer, R. G. 1988. *Gamma and x-ray spectrometry with semiconductor detectors*. New York: North Holland.
- Dias, H. C. T., Schaefer, C. E. G. R., Fernandes Filho, E. I., Oliveira, A. P., Michel, R. F. M., & Lemos Jr, J. B. 2003. Caracterização de solos altimontanos em dois transectos no Parque Estadual do Ibitipoca (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **27**(3).
- Dorr II J. V. N., Gair J, E., Pomerone J. B., Rynearson G. A., 1957. Revisão Estratigráfica Precambriana do Quadrilátero Ferrífero. *Div., Fom. Prod. Min., avulso*(81), 31 p.
- Dorr II J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: . *U.S. Geological Survey Professional Paper 641-A*. Washington D. C. United States Government Printing Office, 109 p.
- Dosseto, A., Schaller, M. 2016. The erosion response to Quaternary climate change quantified using uranium isotopes and in situ-produced cosmogenic nuclides. *Earth-Science Reviews*, **155**: :60–81. 2016.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária . 2013. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2013.
- Esquivel, A. D., Moreira, R. M., Monteiro, R. P. G., Dos Santos, A. A. R., Ayub, J. J., & Valladares, D. L. 2017. Wet deposition and soil content of Beryllium-7 in a micro-watershed of Minas Gerais (Brazil). *Journal of environmental radioactivity*, **169-170**: 56-63.
- Farias, T. R. L. 2008. Produção de sedimentos em bacias hidrográficas sob diferentes contextos geoambientais: medida e modelagem. Dissertação de Mestrado. Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza/CE.
- Faure, G., & Mensing, T. M. 2005. *Isotopes: principles and applications*. Wiley-Blackwell.
- FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2010. *Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida*. Belo Horizonte. Escala 1:650.000.
- Fernandes, T. 2018. *Geochemical behaviour of uranium and thorium in the waste of a uranium conversion facility*. PhD Thesis. Instituto de Ciência I Tecnologia Ambientals. Universitat Autònoma de Barcelona. 255 p.

- Ferreira, A. F., Lazarin, H. A. 1993. *Caracterização litoestrutural e geomorfológica da região do Pico do Itacolomi, Ouro Preto*. Monografia. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP 54p. (Monografia).
- Fink, J. R., Inda, A. V., Tiecher, T., & Barrón, V. 2016. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciência e Agrotecnologia*, **40**(4),): 369-379.
- Forte, C. M. S. 1996. *Determinação das taxas de sedimentação na porção nordeste da baía de Sepetiba utilizando datação com o radioisótopo ²¹⁰Pb em excesso*. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense.
- Fraga, V. da S., & Salcedo, I. H. 2004. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. *Soil Science Society of America Journal*, **68**(1),): 215-224.
- Gair J. E. 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **341A**:1-67.
- Gaspar, L., Navas, A., Machín, J., & Walling, D. E. 2013. Using ²¹⁰Pbex measurements to quantify soil redistribution along two complex toposequences in Mediterranean agroecosystems, northern Spain. *Soil and Tillage Research*, **130**, : 81-90.
- Gauzzi T., Graça, L. M., 2018. A cathodoluminescence-assisted LA-ICP-MS study of topaz from different geological settings. *Brazilian Journal of Geology*, **48**(1): 161-176.
- Glöckner, K. J. 1981. *Lithostratigraphie, sedimentologie, tektonik und metamorphose der proterozoischen Itacolomi serie bei Ouro Preto, Minas Gerais*. Tese de Doutorado. Geolog. Inst. d. Techn. Univ. Clausthal. Alemanha, 221p.
- Godoy, J. M., Padovani, C. R., Pereira, J. C. A., & Vieira, L. M. 1998. Aplicabilidade da geocronologia da deposição de sedimento com ²¹⁰Pb como ferramenta na avaliação do assoreamento do rio Taquari, Pantanal, MS. *Geochimica Brasiliensis*, **12**(2).
- Gonçalves, G. H. T. 2010. *Avaliação Geoambiental de Bacias Contíguas Situadas na Área de Proteção Ambiental da Cachoeira das Andorinhas e Floresta Estadual do Uaimií, Ouro Preto (MG): Diagnóstico e Percepção Ambiental*. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado.
- Guerra, A. T., da Silva, A. S., & Botelho, R. G. M. 2007. *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. 3. ed. Bertrand Brasil. 3ª Edição. 340p.
- Guimarães, D. P; , Landau, E. C.; Barros, C. A. 2009. Áreas homogêneas de precipitação no Estado de Minas Gerais. *Anais do 3º Simpósio Internacional de Climatologia*. Canela, RS, Sociedade Brasileira de Climatologia, 6 p.
- Guimarães, M. F. & Andrello, A. C. 2001. Integração da metodologia do cézio-137 na avaliação de processos erosivos superficiais. *Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão*. Goiânia, GO, 11 p.
- Guimarães, M. F. 1988. *Césio-137 da precipitação radioativa ("fallout") no estudo da erosão e sedimentação de solo*. Piracicaba, S P. Doctoral Thesis. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo- Brazil. , 136 p.
- Harder, E. C. & Chamberlin, R. T. 1915. The geology of Central Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol.*, **23**(4): 341-378.
- Harmon, R. S. and, Rosholt J. N. 1982. Igneous Rocks. In: M. Ivanovich, M., and R. S. Harmon, R. S. (Ed.). *Uranium Series Disequilibrium Applications to Environmental Problems*. Clarendon Press. (ed.), pp. 145-164. Clarendon Press.
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., de Almeida, F. F. M., & Bartorelli, A. 2012. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Oficina de textos. 900 p.
- Hem. J D.. 1978. Sulfur. In: K. H. Wedepohl (EditorEd.). *Handbook of Geochemistry II-2*. Heidelberg, Springer-Verlag, 16-I-K.
- Huh, C. A., & Su, C. C. 2004. Distribution of fallout radionuclides (⁷Be, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb and ^{239,240}Pu) in soils of Taiwan. *Journal of Environmental Radioactivity*, **77**(1): 87-100.

Oliveira, D.D., 2019. Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil).

- Humphries, M. S., Kindness, A., Ellery, W. N., Hughes, J. C., & Benitez-Nelson, C. R. 2010. ^{137}Cs and ^{210}Pb derived sediment accumulation rates and their role in the long-term development of the Mkuze River floodplain, South Africa. *Geomorphology*, **119**(1-2): 88-96.
- Hutchison-Benson, E., Svoboda, J., & Taylor, H. W. 1985. The latitudinal inventory of ^{137}Cs in vegetation and topsoil in northern Canada, 1980. *Canadian Journal of Botany*, **63**(4): 784-791.
- IAEA. 1996. *Report on the First Research Co-ordination Meeting on the Coordinated Research Programme on Assessment of Soil Erosion Through the Use of ^{137}Cs and Related Techniques as a Basis for Soil Conservation, Sustainable Agricultural Production and Environmental Protection*. Vienna, Austria. 70 p.
- IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 2002. *Floresta Nacional do Uaimií, Ouro Preto, Minas Gerais: Projeto Técnico*. 950 p.
- IBGE. 2007. *Manual Técnico de Pedologia. Manuais Técnicos em Geociências nº nº 04*. 2. ed. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2ª Edição. Rio de Janeiro.
- Ibrahim, N. M., Abd El Ghani, A. H., Shawky, E. M., Ashraf, E. M., Farouk, M. A., 1993. Measurement of radioactivity levels in soils in the Nile Delta and Middle Egypt. *Health Physics*, **64** (6),): 620–627.
- IEF. Instituto Estadual de Floresta. 2007. *Plano de Manejo do Parque Estadual da Serra do Rola Moça, incluindo a Estação Ecológica de Fechos*. Encarte 2. 1.ed. Belo Horizonte. , Encarte 2, 91 p.
- IEF. Instituto Estadual de Florestas. 2012. *Plano de Manejo da Floresta Estadual do Uaimií*. Encarte 1. Diagnóstico. Viçosa, Minas Gerais. 177 p.
- IEF. Instituto Estadual de Florestas. 2016. *Plano de Manejo da Estação Ecológica Estadual de Arêdes*. Encarte 1. Caracterização Regional. 467 p.
- IEF. Instituto Estadual de Florestas. 2017. *Plano de Manejo do Parque Estadual Serra do Ouro Branco*. Encarte 1. Diagnóstico. 489 p.
- Jaworowski, W. 1990. Sources and the global cycle of radium. *In: International Atomic Energy Agency. The environmental behaviour of radium*. Vienna: International Atomic Energy Agency, (IAEA Technical Report Series, 310). p. 129–142.
- JCPDS. Joint Committee on Powder Diffraction Standard. 2001. *Data collection PCPDFWIN version 2.2*, June 2001.
- Kulyukhin, S. A., Krasavina, E. P., & Rumer, I. A. 2015. Sorption of ^{137}Cs from aqueous solutions onto layered double hydroxides containing the Fe (CN) 6 4– ion in the interlayer space. *Radiochemistry*, **57**(1),): 69-72.
- Ladeira, E. A. 1980. *Metallogenesis of gold at the Morro Velho Mine and in the Nova Lima District. Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade Ontário, Canadá, Tese de Doutorado, 272 p.
- Lambert, G., Nezami, M. 1965. Importance des retombées sèches dans le bilan du plomb 210. *Ann. Géophys.*, **21**: (245-51).
- Lamounier, W., Carvalho, V., e Salgado, A. 2011. Serra do Gandarela: Possibilidade de Ampliação das Unidades de Conservação no Quadrilátero Ferrífero-MG. *Revista do Departamento de Geografia*, **22**. (171-192). DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2011.0022.0009>.
- Langmuir, D. 1978. Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, n. **42**, p. (547–569).
- Lauria, D. C.; Martins, N. S. F.; Zenaro, R. 2007. *Monitoramento radiológico ambiental*. Rio de Janeiro, IRD/CNEN, p. 166.
- Lepsch, I. F. 2002. *Formação e conservação dos solos*. Oficina de textos. São Paulo, Oficina de textos.
- Mabit, L., & Bernard, C. 1998. Relationship between soil ^{137}Cs inventories and chemical properties in a small intensively cropped watershed. *Comptes Rendus de l'Académie l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, **327**(8),): 527-532.
- Mabit, L.; Benmansour, M.; Walling, D. E. 2008. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of environmental radioactivity*, v. **99**, n. (12, p.): 1799-1807.

- Macêdo, Í. L. 2009. *Estudo de modelos em ambiente de geoprocessamento para a previsão de erosão e assoreamento de reservatórios: o caso da bacia do rio Indaiá-UHE Três Marias, MG*. Distrito Federal, 2009. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- Machado, N., Noce C. M. Feng R. 1993. Idades Pb 207/Pb206 de zircões detríticos de rochas metassedimentares da região do Quadrilátero Ferrífero, sul do Cráton do São Francisco. Considerações sobre as áreas fontes e idades de sedimentação. In: *Anais do II Simpósio do Cráton São Francisco*, Salvador: 149-151.
- Machado, N., Noce C. M., Ladeira E. A., Belo de Oliveira O. Carneiro M. A. 1992. U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, Southern São Francisco Cráton, Brazil. *Geological Society American Bulletin* . , **104**: (1221-1227).
- Madeira, M. D. R. 2018. *Evolução sedimentar e história deformacional da Formação Moeda ao longo da junção entre o Sinclinal da Moeda e o Homoclinal da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. 172 p.
- Malanca, A.; Pessina, V.; Dallara, G. 1993. Radionuclide content of building materials and gamma ray dose rates in dwellings of Rio Grande do Norte, Brazil. *Radiation Protection Dosimetry*, **48**: (199-203).
- Marcolin, C. D., & Klein, V. A. 2011. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum. Agronomy*, **33**(2).
- Marestoni, L. D. 2007. *Estudo da redistribuição de solo superficial em áreas cultivadas e não cultivadas utilizando o fallout do ⁷Be*.
- Maroco, J. 2003. *Análise Estatística com utilização do SPSS*. Lisboa: Edições Sílabo. Malhotra, NK Pesquisa em Marketing. Uma orientação aplicada.
- Marshak S., & Alkmim F. F. 1989. Proterozoic extension/contraction of the souther São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, **8** (3): 355 – 571.
- Martinez, C., Hancock, G. R., & Kalma, J. D. (2010). Relationships between ¹³⁷Cs and soil organic carbon (SOC) in cultivated and never-cultivated soils: an Australian example. *Geoderma*, **158**(3-4),): 137-147.
- Maxwell, C. H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria district, Minas Gerais, Brazil. *Washington, U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 72p (Nº. **341-J**).
- McBride, M. B. 1994. *Environmental chemistry of soil.*, New York, Oxford Univ. Press, 1994.
- Meulman, J. J. (1992). The integration of multidimensional scaling and multivariate analysis with optimal transformations. *Psychometrika*, **57**(4),): 539-565.
- Minas Gerais. 1967. Lei Estadual nº 4.495, de 14 de junho de 1967. Cria o Parque Estadual do Itacolomi, nos Municípios de Ouro Preto e Mariana, em terrenos devolutos do Estado de Minas Gerais. Minas Gerais. *Diário do Executivo*, – 15 de junho de 1967. , pág. 7.
- Minas Gerais. a. 1994a. Decreto Estadual nº 36.071, de 27 de setembro de 1994. Cria o Parque Estadual da Serra do Rola Moça. Minas Gerais. *Diário do Executivo*, – 28 de setembro de 1994. , pág. 5. , col. 1. Disponível em: <https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:minas.gerais:estadual:decreto:1994-09-27;36071>. Consultado Acesso em: 20/12/ dez. 2017.
- Minas Gerais b. 1994b. Decreto Estadual nº 36.073, de 27 de setembro de 1994. Cria Estação Ecológica de Fechos. . Minas Gerais. *Diário do Executivo*, – 28 de setembro de 1994. pág. 6. , col. 2. Disponível em: <https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:minas.gerais:estadual:decreto:1994-09-27;36073>. Acesso em: 20 dez. 2017. Consultado em 20/12/2017.
- Minas Gerais. 2003. Decreto Estadual s/n., de 21 de outubro de 2003. Dispõe sobre a alteração dos limites da área da Estação Ecológica de Arêdes, localizada no Município de Itabirito. Minas Gerais. *Diário do Executivo* – , 22 de outubro de 2003.
- Minas Gerais. 2009. Decreto Estadual nº 44.180, de 21 de setembro de 2009. Cria o Parque Estadual Serra do Ouro Branco, nos Municípios de Ouro Branco e Ouro Preto. Minas Gerais. *Diário do Executivo*, – 22 de setembro de 2009. , pág. 4. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/7551159/pg-4-executivo-diario-oficial-do-estado-de-minas-gerais-doemg-de-22-09-2009>. Consultado Acesso em: 20/12/ dez. 2017.

Oliveira, D.D., 2019. Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil).

- Minas Gerais. 2010. Decreto Estadual nº 45.397, de 14 de junho de 2010. Cria a Estação Ecológica Estadual de Arêdes, no Município de Itabirito, e dá outras providências. Minas Gerais. *Diário do Executivo*, – 15 de junho de 2010. , pág. 1. , col. 2. Disponível em: https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:minas_gerais:estadual:decreto:2010-06-14:45397. Acesso em: 20 dez. 2017Consultado em 20/12/2017.
- Minas Gerais. 2013. Decreto Estadual nº 46.322, de 30 de setembro de 2013. Dispõe sobre a alteração dos limites da área da Estação Ecológica de Arêdes, localizada no Município de Itabirito. Minas Gerais. . *Diário do Executivo* – 31 de setembro de de 2013.
- Minas Gerais. 2013. *Plano de Manejo da RPPN “Santuário do Caraça”*. Belo Horizonte: Minas Gerais. 189 p.
- Minas Gerais. 2014. Lei Estadual nº 21.555, de 22 de dezembro de 2014. Altera os limites da Estação Ecológica Estadual de Arêdes, no Município de. Itabirito. Minas Gerais. *Diário do Executivo*, – 23 de dezembro de 2014. , pág. 2.
- Mizugaki, S., Nakamura, F., & Araya, T. 2006. Using dendrogeomorphology and ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb radiochronology to estimate recent changes in sedimentation rates in Kushiro Mire, Northern Japan, resulting from land use change and river channelization. *Catena*, **68**(1),): 25-40.
- Mollah, S., Rahman, N.M., Kodlus, M.A., Husain, S.R., 1987. Measurement of high natural background radiation levels by TLD at Cox and Bazar coastal areas in Bangladesh. *Radiation Protection Dosimetry*, **18** (1),): 39–41.
- Montes, M. L., Silva, L. M. S., Sá, C. S. A., Runco, J., Taylor, M. A., & Desimoni, J. 2013. Inventories and concentration profiles of ¹³⁷Cs in undisturbed soils in the northeast of Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of environmental radioactivity*, **116**,): 133-140.
- Moore, H. A., & Poet, S. E. 1976. ²¹⁰Pb fluxes determined from ²¹⁰Pb and ²²⁶Ra soil profiles. *Journal of Geophysical Research*, **81**(6),): 1056-1058.
- Moore, W. S., & Dymondt, J. 1988. Correlation of ²¹⁰Pb removal with organic carbon fluxes in the Pacific Ocean. *Nature*, **331**(6154),): 339.
- Moreira, A. A. M., & Pereira, C. C. A. 2004. Levantamento Topoclimático da RPPN Santuário do Caraça. *Caderno de Geografia*, Belo Horizonte, v. **14**, n. (23, p.): 43-50, 2004.
- Moreira, A. C. 2007. Comparação da Análise de Componentes Principais e da CATPCA na Avaliação da Satisfação do Passageiro de uma Transportadora Aérea. *Investigação Operacional*. , **27**(2),): 165-178.
- Mubarakmand, S., Chaudhry, P., & Nagi, F. I. (1977). Absolute determination of uranium concentration in rocks by gamma-ray spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods*, **140**(1),): 133-135.
- Munsell soil-color chats. 2009. *Munsell soil-color charts with genuine Munsell color chips*. Munsell Color, MI, USA. Revised..
- Nascimento, C. T. C. 2003. *Resistividade elétrica e radiação gama natural no estudo de solos sob cerrado nativo*. Tese de Doutorado. UnB, Brasília. 111 p.
- Navas, A., Serrano, E., López Martínez, J., Gaspar, L., & Lizaga, I. 2018. Interpreting environmental changes from radionuclides and soil characteristics in different landform contexts of Elephant Island (Maritime Antarctica). *Land Degradation & Development*, **29**(9),): 3141-3158.
- Nishiyamamoto, E, L. 2014. *Avaliação da abundância, distribuição e comportamento químico de elementos maiores e traços em solos superficiais e perfis pedológicos do Quadrilátero Ferrífero*. 190 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Noce C. M., Machado N., Teixeira W. 1998. U-Pb geochronology of gneises and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (Southern São Francisco Craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**: 95-102.
- Noce C. M., Zucchetti M., Baltazar O. F., Armstrong R., Dantas E. L., Renger F. E., Lobato L. M. 2005. Age of felsic volcanism and the role of ancient continental crust in the evolution of the Neoproterozoic Rio das Velhas greenstone belt (Quadrilátero Ferrífero, Brazil): U-Pb zircon dating of volcanoclastic graywackes. *Precambrian Research*, **141**: 67-82.

- Nosrati, K., Haddadchi, A., Zare, M. R., & Shirzadi, L. 2015. An evaluation of the role of hillslope components and land use in soil erosion using ^{137}Cs inventory and soil organic carbon stock. *Geoderma*, **243**, : 29-40.
- Nozaki, Y., DeMaster, D. J., Lewis, D. M., & Turekian, K. K. 1978. Atmospheric ^{210}Pb fluxes determined from soil profiles. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **83**(C8),): 4047-4051.
- Oliveira, D. S. 2006. Um estudo sobre o desequilíbrio radioativo da série do urânio em amostras de solo. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e C. Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 79 f.
- Oliveira, D. S. D. 2007. *Um estudo sobre o desequilíbrio radioativo da série do urânio em amostras de solo*. Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo.
- Oliveira, L. H. M. de. 2017. *Identificação e análise das unidades de paisagem do Parque Estadual da Serra do Rola-Moça e Estação Ecológica de Fechos, Quadrilátero Ferrífero-Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Cartografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, 44 p.
- Paisani, J. C. 2004. Utilização de diagrfias granulométricas no estabelecimento da lito e pedostratigrafia de rampa arenosa costeira – o caso Praia Mole (Ilha de Santa Catarina). Londrina: *Geografia*, Universidade Estadual de Londrina., **13**(2),): 139-151.
- Paiva, C. T. D. 2008. *Estudo da mobilidade e dispersão de ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra e ^{222}Rn e metais pesados no sistema solo-rocha do depósito de U-ETR de São José de Espinharas (PB)*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 224p.
- Parami, V. K. 2008. *Determination of technologically enhanced naturally occurring radioactive material (TENORM) in ashes from coal-fired thermal power plants in the Philippines*. Thesis, University of the Philippines, Diliman, Quezon City (Philippines).
- Pereira, W. S., Júnior D. A. P. 2002. Monitoração ambiental da unidade de concentrado de urânio (URA) em Caetité, BA, Brasil. *Rev Bras Pesq Des*, v. **4**(3), p.: 673-677, parte 1.
- Persson, B. R. 2014. ^{210}Po and ^{210}Pb in the terrestrial environment. *Curr Adv Environ Sci*, **2**(1),): 22-37.)
- Persson, B. R. 2016. Global distribution of ^7Be , ^{210}Pb and, ^{210}Po in the surface air (with Appendix AE). *Acta Scientiarum Lundensia*, **1**).
- Porto, P., Walling, D. E., Cogliandro, V., & Callegari, G. 2016. Exploring the potential for using ^{210}Pb measurements within a re-sampling approach to document recent changes in soil redistribution rates within a small catchment in southern Italy. *Journal of environmental radioactivity*, **164**, : 158-168.
- Ramli, A. T., Hussein, A. W. M., & Wood, A. K. (2005). Environmental ^{238}U and ^{232}Th concentration measurements in an area of high level natural background radiation at Palong, Johor, Malaysia. *Journal of environmental radioactivity*, **80**(3),): 287-304.
- Rebello, A. M. A., Bittencourt, A. V. L., Mantovani, L. E., Rossi, T. B. 2003. Pedogeochemical models on prognosis and control of radon fluxes from humid tropical landscapes over granite. *Environmental Geology*, **44**:158-168.
- Rebello, A. M., Bittencourt, A. V., & Mantovani, L. E. 2002. Anomalias Geoquímicas de U e de Th, Solos Residuais e Geoformas em Paisagens Tropicais Úmidas Sobre Granito. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. **51**, p. : 33--44.
- Reboita, M. S., Rodrigues, M., Silva, L. F., Alves, M. A.. 2015. Aspectos Climáticos do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, **17**: 206-226.
- Reis, J. S., Lopes, I. R., Schaefer, C. E. G. R., Ker, J. C., Carvalho Filho, A., & Senra, E. O. 2014. *Solos ferruginosos em áreas de canga, sinclinal do gandarela, Quadrilátero Ferrífero (MG)*. In Embrapa Solos- Artigo em anais de congresso (ALICE).
- Renger F.E., Noce C.M., Romano A.W., Machado N. 1994. *Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. *Geonomos*, **2**:1-11.
- Ritchie, J. C., Spraberry, J. A., & McHenry, J. R. 1974. Estimating Soil Erosion from the Redistribution of *Fallout* ^{137}Cs 1. *Soil Science Society of America Journal*, **38**(1),): 137-139.

Oliveira, D.D., 2019. Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil).

- Ritchie, Jerry J. C.; Mchenry, J. Roger. 1990. Application of radioactive *fallout* cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *Journal of environmental quality*, v. **19**, n. (2, p.): 215-233.
- Rogers. J. J. W., & Adams, J. A. S.. 1978. Uranium. In: Wedepohl K. H. (EditorEd.). *Handbook of Geochemistry II-5*. Heidelberg, Springer-Verlag, p. 92-B-CII.
- Romano R., Lana C., Alkmim F. F., Stevens G.S., Armstrong R. 2013. Stabilization of the Southern portion of the São Francisco Craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, **224**:143-159.
- Rosière, C. A., & Chemale Jr, F. 2000. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. *Revista Geonomos*, **8** (2).
- Ruchkys, Ú. A.,. 2007. *Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Potencial para a Criação de um Geoparque da UNESCO*. Tese de Doutorado Belo Horizonte: , Instituto de Geociências, UFMG, 2007. Belo Horizonte, 211 p. Tese de Doutoraento.
- Ruchkys, Ú. A. 2009. Geoparques e a musealização do território: um estudo sobre o Quadrilátero Ferrífero. *Geologia USP. Publicação Especial*, 5, 35-46.
- Ruchkys, Ú. A., & Machado, M. M. M. 2013. Patrimônio geológico e mineiro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Caracterização e iniciativas de uso para educação e geoturismo. *Boletim Paranaense de Geociências*, 70.
- Sahoo, S. K., Hosoda, M., Takahashi, H., Sorimachi, A., Ishikawa, T., Tokonami, S., & Uchida, S. 2011. *Naturally Occurring Radionuclides and Rare Earth Elements Pattern in Weathered Japanese Soil Samples. In Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VI)*.
- Saito, R. T., Figueira, R. C. L., Tessler, M. G., & Cunha, I. I. L. 2001. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs geochronologies in the Cananeia-Iguape estuary (São Paulo, Brazil). *Journal of radioanalytical and nuclear Chemistry*, **249**(1),): 257-261.
- Sakai, T. 1977. *Distribuição do ¹³⁷Cs nos solos do Estado da Bahia, Salvador*. Masters thesis. Universidade Estadual da Bahia, Brazil, 63 p.
- Salgado, A. A. R. 2006. *Estudo da Evolução do Relevo do Quadrilátero Ferrífero, MG – Brasil, através da Quantificação de Dados Erosivos e Denudacionais*. 125p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto, Université Paul Cezanne – AixMarseille III. 125 p.
- Salles, D. M. 2013. *Composição e configuração da paisagem e proposição de corredores como ferramenta para conservação: o Parque Estadual Serra do Rola Moça, Minas Gerais, como estudo de caso*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. 57 p.
- Santos, A. C. 2004. *Redistribuição de ¹³⁷Cs em distintas profundidades e posições topográficas em solo sob pastagem e vegetação nativa*. Tese de Doutorado –. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p.48-68.
- Santos, E. A. 2001. *Estudo de equações de calibração para metodologia do ¹³⁷Cs de determinação da erosão de solos*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Londrina. Paraná. Brasil.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Oliveira, J. B., Coelho, M. R., Lumbrreras, J. F., & Cunha, T. J. F. 2006, . *Sistema brasileiro de classificação de solos* . Rio de Janeiro, Brasil, 306 pp.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Dos Anjos, L. H. C., De Oliveira, V. A., Lumbrreras, J. F., Coelho, M. R., & CUNHA, T. 2006. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2. ed. Rio de Janeiro. , Embrapa Solos, 306 p.
- Schneider. A.. 1978. Sulfur. In: Wedepohl, K. H. (EditorEd.). *Handbook of Geochemistry II-2*. Heidelberg, Springer-Verlag, 16-M-O.
- Schuch, L. A.; Nordenmanm, D. J. R.; Barreto, W. O., ;Cardoso, A. & Zago, A. 1994. Natural and artificial radionuclides in soils from Paraná, Brasil. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **1**:39-40.
- Shakhashiro, A., Tarjan, S., Ceccatelli, A., Kis-Benedek, G., & Betti, M. 2012. IAEA-447: a new certified reference material for environmental radioactivity measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, **70**(8), 1632-1643.

- Shinzato, E. & Carvalho Filho, A. 2005. Pedologia. In: Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Projeto APA Sul RMBH: Estudos do meio físico*. Belo Horizonte, 53p. v. 5., 53 p. (Série Programa Informações Básicas para a Gestão Territorial – GATE).
- Silva, C. M. 2018. ^{226}Ra and ^{228}Ra in anomalous area of Pocinhos-Paraíba. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, **6**(3), 1-14.
- Silva, C. M., Silva Filho, C. A., & Costa Júnior, C. E. O. 2018. ^{210}Pb numa região anômala de Pocinhos-Paraíba. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, **6**(2).
- Silva, S. L., Monteiro, E. A., Baltazar, O. F. Zucchetti, M. 2005. Geologia. In: Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Projeto APA Sul RMBH: Estudos do meio físico*. Belo Horizonte, 64p. v. 16: 1 mapa, 64p. (Série Programa Informações Básicas para a Gestão Territorial – GATE).
- Simmons G. C., & Maxwell C. H. 1961. *Grupo Tamanduá da Série Rio das Velhas*. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, 30 p. (Boletim. 211).
- Soares, N., de Souza, N. M., Andrello, A. C., & Appoloni, C. R. 2009. Activity of ^{137}Cs in soil samples under natural vegetation in the basin of Rio das Ondas in west of Bahia State. *Magistra*, **21**(2): 125-130.
- Souza, J. L. 1998. *Anomalias aerogamespectométricas (K, U e Th) da quadrícula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatados*. Dissertação de Mestrado. UFPR / Geologia, Curitiba. 260 p.
- Teramage, M. T., Onda, Y., Kato, H., Wakiyama, Y., Mizugaki, S., & Hiramatsu, S. 2013. The relationship of soil organic carbon to ^{210}Pb and ^{137}Cs during surface soil erosion in a hillslope forested environment. *Geoderma*, **192**, (59-67).
- Turekian, K. K., Nozaki, Y., & Benninger, L. K. 1977. Geochemistry of atmospheric radon and radon products. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **5**(1), 227-255.
- UNSCEAR, 2000. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations*. United Nations, New York., United Nations.
- UNSCEAR.1988. *Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation*. Annex A: Exposure from Natural Sources of Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, . New York, United Nations. United States, New York.
- USDA. 2008. *Contribution of the USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory to the International Atomic Energy Agency CRP on assess the effectiveness of Soil Conservation techniques for sustainable watershed management and crop production using fallout radionuclides (D1-50-08)*.
- Varajão, C. A. C. 1991. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. **21**, (n.2, p.): 138-145.
- Varajão, C. A. C., Salgado, A. A. R., Varajão, A. F. D. C., Braucher, R., Colin, F., Júnior, N., & Arias, H. 2009. Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (^{10}Be) e da pedogênese. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.**33**, p.: 1409-1425, 2009.
- Walker, T. W.; Syers, J. K. 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, v.**15**, p.0: 1-19, .1976.
- Walling, D. E. 1998. *Use of ^{137}Cs and other fallout radionuclide in soil erosion investigations: progress, problems and prospects* (No. IAEA-TECDOC--1028).
- Walling, D. E., & He, Q. 1999. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Science Society of America Journal*, **63**(5),): 1404-1412.
- Walling, D. E.; Quine, T. A. 1990. Calibration of caesium- ^{137}Cs measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation & Development*, v. **2**, n. (3, p.): 161-175.
- Wasserman, M. A., Bartoly, F., Viana, A. G., Silva, M. M., Rochedo, E. R. R., Perez, D. V., & Conti, C. C. 2008. Soil to plant transfer of ^{137}Cs and ^{60}Co in Ferralsol, Nitisol and Acrisol. *Journal of environmental radioactivity*, **99**(3),): 546-553.

Oliveira, D.D., 2019. Inventário de radionuclídeos em solos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil).

- Wilken, R. D., I. Moreira, I. and , Rebello, A.. . 1986. ^{210}Pb and ^{137}Cs fluxes in a sediment core from Guanabara Bay, Brazil. *Science of the Total Environment*, **58**:195-198.
- Xinbao, Z.; Higgitt, D. L.; Walling, D. E. 1990. A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. *Hydrological Sciences Journal*, v. **35**, n. (3, p.): 243-252.
- Yücel, H., Ergin, İ., Çetiner, M. A., Demirel, H., Tan, M., & Özmen, A. 2000. *A gamma spectrometric method for direct measurement of uranium contents in solid samples*. kutuphane -. Disponível em: taek.gov.tr/internet_tarama/dosyalar/cd/388.
- Zapata, F. Ed. 2002. *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, 185–215*. © 2002 IAEA.
- Zucchetti, M., Lobato, L. M., Baars, F. J. 2000b. Genetically diverse basalt geochemical signatures developed in the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 397-402.
- Zucchetti, M., Lobato, L. M., Baltazar, O. F. 2000a. Volcanic and volcanoclastic features in Archean rocks and their tectonic environment, Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, MG, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 388-392.
- Zygmunt, J.; , Chibowski, S., & Klimowicz, Z. 1998. The effect of sorption properties of soil minerals on the vertical migration rate of cesium in soil. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **231**:57-62.

APÊNDICE A
CORRELAÇÕES E CONCENTRAÇÕES DOS ELEMENTOS ESTÁVEIS
DETECTADOS

Tabela A.1 – Matriz de Correlação de Pearson

	COT	Areia G	Areia F	Silte	Argila	²¹⁰ Pb _t	²¹⁰ Pb _{ex}	²¹⁰ Pb _{sup}	¹³⁷ Cs	²³⁸ U	Mo	Be	Li	Pb	Th	As	Y	Sc	Zn	Sr	Cu	Co	Zr	Ni	V	Ba	P	Cr	S	Mg	Ca	Na	Ti	Si	Mn	K	Al	Fe											
COT	1,0																																																
Areia G	-0,3	1,0																																															
Areia F	0,2	-0,5	1,0																																														
Silte	0,0	-0,7	-0,1	1,0																																													
Argila	0,5	-0,6	-0,1	0,4	1,0																																												
²¹⁰ Pb _t	0,7	-0,4	0,4	0,0	0,4	1,0																																											
²¹⁰ Pb _{ex}	0,7	-0,3	0,3	-0,1	0,3	1,0	1,0																																										
²¹⁰ Pb _{sup}	0,2	-0,4	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1	1,0																																									
¹³⁷ Cs	0,8	-0,1	0,3	-0,2	0,2	0,7	0,7	0,0	1,0																																								
²³⁸ U	0,2	-0,4	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1	1,0	0,0	1,0																																							
Mo	-0,1	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	-0,1	0,5	1,0																																						
Be	-0,2	-0,1	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,2	0,3	-0,3	0,3	0,4	1,0																																					
Li	0,1	-0,5	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	1,0																																				
Pb	0,2	0,0	0,2	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,0	-0,1	-0,1	1,0																																			
Th	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,3	-0,1	0,3	0,6	0,2	0,0	0,0	1,0																																		
As	0,0	0,0	-0,2	0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	1,0																																	
Y	-0,1	-0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,6	-0,2	0,6	0,3	0,7	0,5	0,0	0,2	0,2	1,0																																
Sc	0,1	-0,4	-0,1	0,5	0,4	0,2	0,1	0,2	-0,1	0,2	0,0	0,4	0,7	-0,1	0,0	0,2	0,6	1,0																															
Zn	0,3	-0,5	0,1	0,5	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,4	-0,1	0,3	0,6	0,1	0,0	0,2	0,6	0,6	1,0																														
Sr	-0,2	-0,1	-0,1	0,2	0,1	-0,1	-0,1	0,1	-0,2	0,1	-0,1	0,6	0,4	-0,1	-0,1	0,3	0,6	0,6	0,5	1,0																													
Cu	0,1	-0,4	-0,1	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	-0,1	0,2	0,5	0,0	-0,1	0,2	0,5	1,0	0,7	0,5	1,0																												
Co	0,2	-0,3	0,4	0,0	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	-0,1	-0,1	0,2	0,2	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	1,0																											
Zr	0,1	-0,5	0,2	0,3	0,4	0,3	0,1	0,7	-0,2	0,7	0,5	0,6	0,4	0,0	0,3	0,1	0,8	0,6	0,4	0,4	0,5	0,1	1,0																										
Ni	0,0	-0,3	-0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,4	0,9	-0,1	-0,1	0,1	0,4	0,9	0,5	0,5	0,8	0,1	0,4	1,0																									
V	0,2	-0,4	-0,1	0,5	0,5	0,2	0,1	0,2	-0,1	0,2	-0,1	0,3	0,6	0,0	0,0	0,1	0,6	1,0	0,6	0,5	1,0	0,1	0,6	0,8	1,0																								
Ba	-0,2	-0,4	0,2	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	-0,2	0,5	0,7	0,0	-0,1	0,2	0,5	0,6	0,3	0,7	0,5	0,4	0,4	0,7	0,5	1,0																							
P	0,3	-0,3	0,2	0,3	0,0	0,3	0,2	0,5	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,4	0,3	0,7	0,1	0,4	0,2	0,2	0,0	0,4	-0,1	1,0																						
Cr	0,1	-0,4	-0,1	0,5	0,5	0,1	0,2	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,3	0,7	-0,1	-0,1	0,1	0,4	0,9	0,5	0,4	0,9	0,0	0,4	0,9	0,9	0,6	0,1	1,0																					
S	0,3	-0,2	0,3	0,0	-0,1	0,3	0,2	0,5	0,3	0,5	0,0	-0,2	0,0	0,3	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,4	-0,2	0,1	0,3	0,2	-0,2	0,1	-0,2	0,8	-0,1	1,0																				
Mg	0,1	-0,6	0,2	0,5	0,5	0,3	0,2	0,4	-0,1	0,4	0,2	0,5	0,8	-0,1	0,1	0,0	0,7	0,7	0,5	0,3	0,6	0,1	0,8	0,7	0,7	0,5	0,2	0,7	0,1	1,0																			
Ca	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,2	0,2	-0,1	0,2	0,0	1,0																		
Na	-0,2	-0,1	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,2	0,0	-0,1	0,5	0,4	-0,1	0,0	0,3	0,6	0,6	0,3	0,9	0,6	0,1	0,3	0,5	0,5	0,8	0,0	0,5	-0,3	0,3	-0,1	1,0																	
Ti	0,3	-0,5	0,0	0,5	0,5	0,3	0,2	0,5	-0,1	0,5	0,0	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	0,6	0,9	0,6	0,4	0,9	0,2	0,8	0,6	0,9	0,4	0,5	0,7	0,3	0,7	0,1	0,4	1,0																
Si	0,2	-0,3	-0,1	0,4	0,5	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,2	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,7	0,3	0,0	0,7	0,0	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,7	0,2	0,4	0,1	0,2	0,7	1,0															
Mn	0,2	0,0	0,3	-0,1	-0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	-0,1	-0,2	-0,2	0,5	0,0	-0,1	0,0	-0,2	0,3	-0,2	0,0	0,3	-0,1	-0,3	-0,1	-0,2	0,7	-0,3	0,8	-0,2	0,0	-0,3	0,0	-0,1	1,0														
K	-0,2	-0,2	-0,1	0,3	0,2	0,0	0,0	0,1	-0,2	0,1	0,0	0,6	0,7	-0,2	0,0	0,3	0,7	0,8	0,4	0,9	0,7	0,1	0,5	0,8	0,7	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,6	-0,2	0,9	0,6	0,3	-0,4	1,0												
Al	0,1	-0,4	0,0	0,5	0,5	0,2	0,1	0,3	-0,2	0,3	0,0	0,4	0,7	-0,1	0,0	0,1	0,6	1,0	0,6	0,6	0,9	0,1	0,7	0,8	1,0	0,6	0,3	0,9	0,0	0,8	0,0	0,6	0,9	0,6	-0,2	0,8	1,0												
Fe	0,2	-0,2	0,2	0,3	-0,1	0,1	0,0	0,3	0,3	0,3	0,0	-0,2	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,6	-0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,2	0,1	-0,3	0,8	-0,1	0,6	-0,1	0,3	-0,3	0,2	0,1	0,6	-0,3	-0,1	1,0											

Tabela A.2 – Concentrações dos elementos químicos (mg/kg) das análises de digestão total das amostras de cambissolos superficiais do QF.

(continua)

UC	Cm	Mo	Be	Li	Pb	Th	As	Y	Sc	Zn	Sr	Cu	Co	Zr	Ni	V	Ba	P	Cr	S	Mg	Ca	Na	Ti	Si	Mn	K	Al	Fe
OBR	1	1,2	0,5	1,2	8,9	29,8	11,2	1,6	1,4	7,2	9,1	0,0	26,5	60,1	6,3	19,2	261,1	85,4	14,5	21,1	381,7	116,1	1590,1	1347,9	180,1	104,7	6172,4	25640,1	987,8
OBR	2	1,2	0,5	1,2	8,9	29,8	11,2	1,3	1,4	13,7	8,9	0,0	28,0	61,1	6,3	19,1	257,3	82,5	14,2	21,1	374,9	116,1	1724,8	1320,5	206,1	79,9	6110,4	25871,0	987,8
OBR	3	1,2	0,5	1,3	8,9	29,8	11,2	2,2	1,4	5,8	8,8	0,0	34,7	64,9	6,3	19,0	258,6	80,4	14,3	21,1	373,9	116,1	1739,3	1330,2	144,5	72,8	6120,6	26064,9	987,8
OBR	6	1,2	0,5	1,3	8,9	29,8	11,2	1,7	1,5	3,8	8,8	0,0	31,1	57,4	6,3	19,3	258,7	74,9	15,4	21,1	366,6	116,1	1676,6	1353,1	156,7	53,5	6082,3	26228,6	987,8
OBR	9	1,2	0,5	1,4	8,9	29,8	11,2	1,7	1,6	3,8	9,2	0,0	35,7	57,1	6,3	20,0	268,4	73,0	17,7	47,7	375,5	116,1	1359,4	1351,9	152,9	47,6	6227,1	27327,8	987,8
OBR	12	1,2	0,5	1,4	8,9	29,8	11,2	2,3	1,5	3,8	9,1	0,0	28,8	61,5	6,3	20,0	271,7	71,4	18,5	49,2	380,0	116,1	1365,6	1323,4	157,6	45,0	6344,3	28642,0	987,8
OBR	18	1,2	0,5	1,4	8,9	29,8	11,2	1,8	1,6	3,3	9,4	0,0	31,3	60,9	6,3	21,1	283,3	67,3	16,6	21,1	390,4	116,1	1350,8	1420,3	176,7	46,2	6542,7	29252,1	987,8
OBR	24	1,2	0,5	1,5	8,9	29,8	11,2	3,0	1,7	3,9	9,7	0,0	27,8	69,1	6,3	21,6	295,3	67,4	16,4	21,1	407,0	116,1	1315,5	1422,9	165,9	44,7	6862,9	30746,9	987,8
OBR	30	1,2	0,5	1,6	8,9	29,8	11,2	2,8	1,7	4,7	10,0	0,0	26,9	69,8	6,3	22,0	306,4	66,9	16,3	21,1	418,7	116,1	1310,6	1423,9	177,5	44,8	7131,4	32087,0	987,8
OBR	40	1,2	0,5	1,7	8,9	29,8	11,2	3,9	1,8	6,7	10,5	0,0	22,5	72,7	6,3	23,2	319,4	66,4	17,4	21,1	436,4	116,1	1293,8	1477,0	187,4	46,3	7460,6	33664,2	2725,0
OBR	50	1,2	0,5	1,7	8,9	29,8	11,2	3,4	1,9	4,6	11,4	0,0	27,9	80,7	6,3	24,1	344,1	67,3	18,4	21,1	456,1	116,1	1284,5	1538,5	201,9	48,7	8073,9	35602,4	3192,6
OBR	60	1,2	0,5	1,9	8,9	29,8	11,2	3,8	2,0	5,6	12,8	0,0	24,2	76,7	6,3	26,8	393,1	72,4	19,2	21,1	504,1	116,1	1284,9	1625,7	229,2	54,3	9141,2	41393,4	4480,0
CAR	1	1,2	0,5	1,2	8,9	29,8	11,2	0,2	1,0	2,7	0,4	0,0	12,1	27,3	6,3	14,4	39,5	99,7	13,2	153,9	268,8	116,1	1140,1	789,9	127,3	8,9	992,2	16053,6	987,8
CAR	2	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	1,1	0,2	4,7	0,4	0,0	5,9	32,0	6,3	16,0	43,8	105,0	14,5	206,6	353,4	116,1	202,5	833,2	164,1	20,5	980,8	17403,7	987,8
CAR	3	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	2,0	0,2	4,4	0,4	0,0	5,0	43,9	6,3	16,0	43,2	102,8	14,6	195,2	359,0	116,1	200,6	903,8	162,0	19,1	986,2	17727,1	987,8
CAR	6	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	1,4	0,2	4,0	0,4	0,0	7,1	33,1	6,3	12,7	33,9	81,8	12,0	159,4	289,0	116,1	211,6	739,9	155,2	8,9	746,3	14184,6	987,8
CAR	9	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	1,3	0,2	2,0	0,4	0,0	6,0	33,1	6,3	12,9	33,6	87,4	12,3	167,5	275,0	116,1	216,1	724,6	153,5	8,9	695,4	13982,7	987,8
CAR	12	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	0,9	0,2	0,9	0,4	0,0	4,8	24,4	6,3	11,0	25,7	71,6	10,5	138,0	222,6	116,1	186,3	556,9	156,0	8,9	510,6	11591,5	987,8
CAR	18	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	0,2	0,2	0,0	0,4	0,0	3,3	18,9	6,3	11,3	24,6	49,2	9,6	91,6	203,3	116,1	198,6	452,4	150,5	8,9	483,3	11048,7	987,8
CAR	24	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	0,7	0,2	1,8	0,4	0,0	0,0	25,8	6,3	15,8	33,3	53,3	13,2	87,0	267,0	116,1	179,9	557,8	162,1	8,9	711,1	15374,4	987,8
CAR	30	1,2	0,5	0,0	8,9	29,8	11,2	0,6	0,2	1,5	0,4	0,0	3,4	24,2	6,3	18,0	32,6	45,7	12,8	75,9	255,4	116,1	187,5	493,2	155,6	8,9	684,5	15297,3	987,8
CAR	40	1,2	0,5	2,0	8,9	29,8	11,2	2,7	0,2	8,7	1,2	5,7	0,0	62,3	6,3	57,9	97,8	88,9	38,3	101,7	662,2	116,1	221,2	1036,0	365,5	32,1	2369,6	45902,9	11896,8
CAR	50	1,2	0,5	4,2	8,9	29,8	11,2	4,2	1,2	17,8	3,5	6,2	4,8	87,4	6,3	45,2	193,8	95,9	57,9	85,0	1150,7	116,1	251,7	1182,3	501,7	52,6	4774,9	69532,1	27824,6
CAR	60	1,2	0,5	2,7	8,9	29,8	11,2	6,8	8,1	58,4	21,5	22,9	17,1	109,2	14,8	104,3	101,7	565,5	77,2	542,9	952,3	3228,0	429,0	5037,8	1457,2	3519,4	761,0	57553,9	227783,8
RLM	1	1,2	0,5	2,4	8,9	29,8	11,2	6,5	8,2	56,0	15,4	25,4	12,1	108,8	14,5	108,2	100,1	541,0	85,8	438,2	769,5	1673,2	341,4	5220,8	1099,0	3417,2	660,9	57863,8	241979,4
RLM	2	1,2	0,5	2,5	8,9	29,8	11,2	7,0	8,6	55,2	14,9	22,7	28,3	116,1	14,3	111,3	106,6	521,1	85,3	402,5	742,9	1441,9	463,0	5191,2	2016,2	3651,3	619,2	58981,3	248405,9
RLM	3	1,2	0,5	2,5	8,9	29,8	11,2	7,1	10,9	44,9	9,4	23,9	13,8	122,2	16,0	120,0	96,1	400,8	80,5	200,6	550,0	260,5	357,7	5832,5	1314,2	2546,1	615,4	69607,3	246092,8
RLM	6	1,2	0,5	2,5	8,9	29,8	11,2	7,4	9,2	54,8	12,3	23,5	39,9	119,5	15,5	112,8	130,8	501,8	81,5	361,3	680,1	739,7	357,0	5405,5	1030,4	3511,5	658,2	62515,4	243911,0
RLM	9	1,2	0,5	2,4	8,9	29,8	11,2	6,8	9,9	48,8	11,6	24,6	12,9	115,4	16,0	116,1	136,7	489,1	81,6	328,7	624,4	534,3	321,3	5531,2	1260,2	3348,7	635,6	66197,4	243340,8
RLM	12	1,2	0,5	2,5	8,9	29,8	11,2	7,0	10,1	46,2	10,2	23,2	15,4	118,0	15,4	115,4	150,1	462,0	76,1	316,3	580,2	348,8	330,8	5746,0	1411,1	3018,1	614,4	67033,9	242398,7
RLM	18	1,2	0,5	2,4	8,9	29,8	11,2	6,7	10,1	45,2	9,9	23,2	16,1	116,5	15,4	114,7	133,0	455,5	75,8	321,1	573,4	308,9	325,6	5836,4	1635,0	2913,2	604,2	66697,2	241250,6
RLM	24	1,2	0,5	2,5	8,9	29,8	11,2	6,7	10,0	43,8	9,5	24,7	14,5	115,1	16,1	113,5	128,4	415,4	73,7	327,4	554,0	287,9	349,9	5654,2	1803,4	2777,6	591,1	66278,3	238663,8
RLM	30	1,2	0,5	2,6	8,9	29,8	11,2	7,8	10,4	45,6	10,3	23,8	18,4	128,2	15,4	116,9	192,7	423,7	76,1	325,4	556,7	290,9	390,4	5867,8	2097,2	2955,2	636,3	68231,4	244580,0
RLM	40	1,2	0,5	2,3	8,9	29,8	11,2	6,9	10,4	44,0	8,8	20,6	13,0	114,9	14,2	114,3	64,3	397,8	73,6	245,7	538,5	116,1	269,9	5647,4	758,5	2671,5	512,1	66587,7	240558,3
RLM	50	1,2	0,5	2,9	8,9	29,8	11,2	7,6	11,0	46,0	9,2	21,3	13,8	127,4	14,6	119,3	62,5	401,9	80,4	198,8	553,7	234,4	294,3	5984,4	632,3	2551,3	554,9	69471,7	249054,3
RLM	60	1,2	0,5	3,5	17,8	29,8	11,2	9,5	9,7	54,2	6,5	30,0	33,6	98,1	15,2	113,7	196,3	874,4	71,0	732,3	805,7	334,6	322,3	4823,7	614,5	33314,8	818,4	49315,3	241160,7

Tabela A.2 – Concentrações dos elementos químicos (mg/kg) das análises de digestão total das amostras de cambissolos superficiais do QF.

(continuação)

UC	Cm	Mo	Be	Li	Pb	Th	As	Y	Sc	Zn	Sr	Cu	Co	Zr	Ni	V	Ba	P	Cr	S	Mg	Ca	Na	Ti	Si	Mn	K	Al	Fe
GRD-1	1	1,2	0,5	3,2	0,0	29,8	11,2	11,6	9,8	52,4	6,6	30,5	32,2	109,6	15,9	114,8	196,2	850,4	67,9	669,9	804,2	354,2	284,7	5022,3	847,8	32621,0	752,8	49406,7	240675,3
GRD-1	2	1,2	0,5	3,4	19,2	29,8	11,2	9,9	10,1	51,1	6,2	30,7	33,8	100,5	15,7	116,3	199,9	843,5	69,0	660,2	790,7	298,7	346,1	5065,6	1061,3	33831,4	764,2	49241,3	245309,6
GRD-1	3	1,2	0,5	3,4	19,9	29,8	11,2	10,7	10,4	52,9	6,2	31,3	33,7	106,1	14,6	118,3	183,0	865,0	68,9	679,6	801,4	324,8	248,8	5190,5	385,5	33259,5	735,7	50754,5	247780,3
GRD-1	6	1,2	0,5	3,4	20,2	29,8	11,2	11,5	10,8	52,4	6,2	33,3	36,1	109,7	14,3	121,6	182,7	869,7	73,4	709,2	816,8	351,4	322,1	5247,0	655,9	33980,4	752,9	51410,8	251351,1
GRD-1	9	1,2	0,5	3,4	19,9	29,8	11,2	11,2	10,7	51,5	6,1	31,5	36,1	110,2	14,6	121,6	191,4	868,0	74,1	745,3	805,4	309,4	523,1	5237,3	828,5	34321,6	761,9	51374,0	255172,7
GRD-1	12	1,2	0,5	3,1	19,1	29,8	11,2	12,5	12,0	50,7	5,7	31,8	35,9	119,3	13,7	129,9	173,4	894,4	74,0	783,6	827,1	116,1	325,5	5425,7	963,2	34252,8	915,0	55317,2	258583,3
GRD-1	18	1,2	0,5	3,0	8,9	29,8	11,2	13,1	14,1	51,2	5,3	31,3	33,0	124,3	6,3	140,5	137,6	906,5	73,4	1066,1	889,5	116,1	379,0	5916,1	3222,1	32468,1	851,7	61965,8	282868,4
GRD-1	24	1,2	0,5	3,4	8,9	29,8	11,2	12,8	14,0	55,0	5,3	30,2	35,4	121,5	6,3	140,5	139,0	885,9	81,4	1230,9	898,4	116,1	348,6	5862,7	2763,6	31730,8	817,6	63072,1	274760,1
GRD-1	30	1,2	0,5	3,5	8,9	29,8	11,2	13,0	14,4	54,3	6,3	28,9	35,2	131,5	13,8	144,9	182,1	813,2	77,0	1266,7	915,2	116,1	382,1	6193,4	3010,9	32204,2	987,7	69323,4	274166,3
GRD-1	40	1,2	0,5	4,5	8,9	29,8	11,2	15,1	14,3	53,9	6,2	29,4	34,4	144,8	16,4	148,2	177,9	820,2	78,2	1232,1	924,0	116,1	214,7	6118,8	734,7	32160,6	895,4	69225,6	277052,4
GRD-1	50	1,2	0,5	3,1	8,9	29,8	11,2	14,4	14,4	52,2	5,6	28,6	32,9	135,3	13,1	146,3	159,3	868,0	80,2	1356,0	912,7	116,1	204,3	6221,6	753,3	31254,7	812,0	67836,9	277862,5
GRD-1	60	1,2	0,5	5,9	8,9	29,8	11,2	13,3	47,8	50,7	18,1	81,5	14,5	173,9	187,3	333,2	259,7	622,4	951,4	393,9	2002,3	832,3	1645,6	9974,2	4857,0	428,9	19039,7	136261,0	133649,2
ARD	1	1,2	0,5	5,8	8,9	29,8	11,2	12,5	47,0	44,7	15,2	82,2	14,4	173,2	187,6	338,4	250,4	605,1	961,1	391,4	1856,8	592,8	1689,5	10262,7	5356,9	370,0	18540,1	136304,4	131208,6
ARD	2	1,2	0,5	6,1	8,9	29,8	11,2	13,0	45,7	45,7	15,1	83,4	15,4	179,9	188,3	337,6	261,1	590,3	951,6	396,1	1863,2	523,7	2012,5	10542,2	10304,9	343,3	17711,4	134795,4	128854,9
ARD	3	1,2	0,5	5,9	8,9	29,8	11,2	13,1	47,2	44,9	13,7	84,3	15,6	181,9	187,3	343,5	212,2	570,4	964,8	377,8	1822,7	317,7	1589,0	10515,7	6629,3	307,8	17732,0	136949,1	127123,3
ARD	6	1,2	0,5	6,2	8,9	29,8	11,2	13,1	48,4	41,9	14,0	84,7	14,9	176,8	188,3	343,6	223,2	560,5	971,1	359,5	1836,8	278,2	1769,3	10408,4	9752,3	286,8	18349,5	138445,5	128484,0
ARD	9	1,2	0,5	6,1	8,9	29,8	11,2	13,8	46,8	40,3	13,8	86,1	15,1	182,3	191,7	349,2	245,7	557,3	990,0	356,0	1821,2	285,8	1763,2	10363,8	8852,9	274,3	17445,8	137382,9	130872,0
ARD	12	1,2	0,5	5,9	8,9	29,8	11,2	13,0	43,4	38,8	13,2	91,4	15,6	184,0	192,6	349,4	228,3	546,9	999,6	327,1	1778,3	116,1	1629,3	10722,6	7623,3	268,7	15434,6	131699,6	131620,4
ARD	18	1,2	0,5	5,9	8,9	29,8	11,2	13,8	49,2	49,0	13,4	95,9	16,1	174,4	198,7	351,0	250,9	573,1	1049,2	301,1	1746,0	270,8	2003,1	9724,3	12242,2	302,4	18467,8	140299,4	144364,6
ARD	24	1,2	0,5	5,3	8,9	29,8	11,2	12,6	44,2	50,9	12,3	93,8	16,3	171,2	206,8	368,3	201,7	587,2	1198,4	282,3	1653,2	116,1	1337,5	9368,1	5900,5	329,8	15428,9	137227,2	160363,3
ARD	30	1,2	0,5	5,4	8,9	29,8	11,2	13,4	45,1	47,2	12,1	93,2	16,8	168,0	216,7	362,0	194,2	539,9	1189,9	209,4	1585,2	116,1	1415,0	9433,2	7701,9	305,2	16467,3	138818,7	156827,5
ARD	40	1,2	0,5	6,5	8,9	29,8	11,2	15,7	52,5	58,5	14,6	120,3	21,8	172,1	323,7	360,5	240,2	654,6	1062,0	126,1	1750,7	116,1	1473,8	9581,8	1873,0	279,9	21590,6	145338,1	144522,5
ARD	50	1,2	0,5	6,9	8,9	29,8	11,2	14,8	48,6	50,1	15,6	106,3	20,2	174,8	302,2	374,7	267,4	446,4	1062,7	99,3	1910,4	116,1	1574,7	10165,6	1883,4	253,3	21779,6	142864,7	134164,7
ARD	60	1,2	0,5	2,4	8,9	29,8	11,2	7,0	0,2	44,6	3,4	15,2	7,1	17,1	12,7	27,2	94,5	666,6	41,0	531,2	725,7	392,3	279,8	885,9	639,0	4445,6	476,9	13498,8	269511,3
FCH	1	1,2	0,5	2,3	8,9	29,8	11,2	7,0	0,2	44,3	2,9	14,0	11,2	15,6	6,3	26,4	90,1	637,2	40,0	444,8	701,6	294,0	280,0	827,8	602,3	4772,6	427,0	12633,4	276966,1
FCH	2	1,2	0,5	2,1	8,9	29,8	11,2	7,6	0,2	48,1	2,8	15,2	15,3	15,3	6,3	26,7	106,6	650,3	40,0	418,4	716,2	409,7	305,1	841,9	1074,1	5171,3	424,1	13133,9	277062,1
FCH	3	1,2	0,5	2,0	8,9	29,8	11,2	7,6	0,2	44,4	2,1	13,3	25,4	14,9	6,3	25,3	93,2	612,1	35,4	351,7	684,8	116,1	217,0	805,3	349,5	4908,6	356,3	12251,5	272096,2
FCH	6	1,2	0,5	2,0	8,9	29,8	11,2	7,6	0,2	41,2	2,0	13,7	11,3	14,8	6,3	24,9	87,1	593,6	34,4	349,8	681,6	261,0	212,6	781,9	246,9	4680,6	340,0	12259,4	275214,2
FCH	9	1,2	0,5	1,7	8,9	29,8	11,2	7,7	0,2	39,3	1,6	12,2	7,8	11,1	6,3	22,7	94,7	536,6	27,3	263,3	647,8	116,1	205,8	684,6	296,9	4582,5	242,3	10994,5	274976,1
FCH	12	1,2	0,5	1,4	8,9	29,8	11,2	7,7	0,2	36,9	1,5	11,7	14,7	9,5	6,3	20,2	95,9	506,4	22,7	246,7	619,5	116,1	197,0	577,4	275,5	4741,2	205,3	10370,0	269809,4
FCH	18	1,2	0,5	1,5	8,9	29,8	11,2	8,9	0,2	39,2	1,6	11,6	7,5	6,7	6,3	18,1	102,7	485,3	17,8	206,9	632,0	116,1	187,8	459,5	248,0	4869,9	144,5	9636,7	275596,6
FCH	24	1,2	0,5	1,6	8,9	29,8	11,2	8,9	0,2	37,5	1,4	10,3	5,0	8,6	6,3	19,5	107,2	479,5	18,8	172,4	613,5	116,1	180,3	521,1	199,7	4796,2	151,0	10128,1	272269,6
FCH	30	1,2	0,5	2,3	8,9	29,8	11,2	9,2	0,2	38,9	2,2	11,2	5,8	10,5	6,3	21,3	116,8	507,6	23,7	152,5	613,0	116,1	187,3	610,1	223,4	5302,1	154,4	11094,7	277351,3
FCH	40	1,2	0,5	1,1	8,9	29,8	11,2	8,5	0,2	36,4	0,4	9,3	3,3	4,5	6,3	15,4	115,6	498,0	15,2	152,0	608,9	116,1	182,7	350,0	231,9	4623,2	78,7	8656,0	274086,8
FCH	50	1,2	0,5	1,0	8,9	29,8	11,2	8,6	0,2	35,7	0,4	11,4	5,1	4,3	6,3	15,4	111,8	499,8	15,1	153,3	592,8	116,1	174,6	353,4	246,7	4573,6	270,6	8461,8	276917,9
FCH	60	1,2	0,5	12,1	8,9	29,8	11,2	12,9	23,2	51,1	13,4	36,2	9,1	131,5	223,9	173,5	308,5	327,7	673,8	482,9	2077,1	116,1	720,8	5075,5	1633,8	189,2	14291,4	92436,8	75217,2

Tabela A.2 – Concentrações dos elementos químicos (mg/kg) das análises de digestão total das amostras de cambissolos superficiais do QF.

UC	Cm	Mo	Be	Li	Pb	Th	As	Y	Sc	Zn	Sr	Cu	Co	Zr	Ni	V	Ba	P	Cr	S	Mg	Ca	Na	Ti	Si	Mn	K	Al	Fe
UAI	1	1,2	0,5	11,5	8,9	29,8	11,2	8,1	20,5	44,6	5,1	34,9	12,4	133,1	211,8	171,6	197,8	319,2	671,9	441,0	1389,6	116,1	661,4	5111,9	944,1	175,6	13244,7	88296,6	73923,2
UAI	2	1,2	0,5	12,3	8,9	29,8	11,2	12,1	23,7	52,7	13,9	36,2	126,7	131,1	226,7	174,5	334,4	307,2	688,4	409,8	2116,3	116,1	693,2	5049,6	1413,4	183,3	14409,7	93147,9	75265,9
UAI	3	1,2	0,5	12,3	8,9	29,8	11,2	11,0	23,1	47,1	12,5	34,6	51,2	129,7	222,2	172,7	290,4	265,5	671,4	328,7	1990,0	116,1	688,6	4982,8	973,9	176,1	14020,6	92106,6	71700,2
UAI	6	1,2	0,9	13,1	8,9	29,8	11,2	12,1	24,8	50,5	14,4	37,6	12,7	134,5	234,4	181,5	314,0	264,8	715,5	313,7	2163,7	116,1	682,7	5242,1	1012,2	191,4	14850,6	97376,8	75423,5
UAI	9	1,2	1,0	13,9	8,9	29,8	11,2	11,7	26,1	51,7	15,4	37,2	19,3	138,5	244,9	188,5	336,9	249,2	737,7	278,6	2278,5	116,1	723,5	5256,0	1280,1	183,8	15593,1	101052,1	77605,3
UAI	12	1,2	1,0	14,4	8,9	29,8	11,2	11,8	27,1	53,1	16,0	37,9	14,0	141,8	253,3	193,1	352,0	235,0	753,7	236,7	2332,3	310,0	807,6	5299,8	1932,3	187,8	15809,5	105257,4	79803,9
UAI	18	1,2	0,9	13,4	8,9	29,8	11,2	9,6	24,3	48,9	10,5	36,5	17,9	141,5	233,3	182,7	281,7	207,9	731,1	192,6	1858,0	116,1	725,3	5209,5	1543,6	177,3	14187,0	95669,7	76425,1
UAI	24	1,2	1,0	15,4	8,9	29,8	11,2	14,0	29,0	54,8	16,3	39,8	31,8	153,1	264,7	198,4	346,8	210,9	799,0	206,3	2394,1	116,1	751,2	5588,8	1456,5	191,5	16171,1	107823,8	82159,6
UAI	30	1,2	1,0	16,0	8,9	29,8	11,2	13,0	30,0	55,5	16,8	40,6	10,9	155,9	270,5	202,3	366,3	206,6	820,5	162,5	2431,4	116,1	912,9	5698,0	2406,6	196,2	16390,8	111044,3	84520,1
UAI	40	1,2	1,0	15,7	8,9	29,8	11,2	14,5	29,5	53,9	16,2	38,9	8,1	155,8	256,7	201,6	348,3	201,7	819,9	134,9	2378,6	116,1	790,9	5785,5	1693,6	201,2	15857,7	108917,0	85421,6
UAI	50	1,2	1,0	16,0	8,9	29,8	11,2	14,4	30,7	53,3	15,1	43,0	7,3	169,2	257,2	213,2	319,7	195,4	873,6	118,9	2258,8	116,1	701,2	6042,1	936,3	208,1	15813,0	112665,1	92229,5
UAI	60	1,2	0,5	4,3	8,9	29,8	11,2	15,0	17,9	39,5	15,5	21,3	51,7	234,5	30,7	137,8	265,1	536,0	143,7	470,7	1890,8	321,4	948,1	6389,2	1177,8	558,1	9751,9	76792,5	104651,6
ITA	1	1,2	0,5	4,2	8,9	29,8	11,2	16,1	17,5	41,4	15,8	21,3	22,9	237,4	30,5	136,2	239,8	547,8	143,6	521,0	1882,1	367,9	910,9	6677,1	747,3	634,6	9637,7	75492,3	104888,2
ITA	2	1,2	0,9	4,5	8,9	29,8	11,2	16,6	18,7	40,5	15,6	21,3	17,2	251,3	30,8	142,5	255,0	546,8	148,4	456,8	1960,3	254,6	967,0	6584,1	1082,6	549,5	10208,0	79150,7	109865,2
ITA	3	1,2	0,5	4,5	8,9	29,8	11,2	15,3	19,0	37,5	15,3	22,3	45,0	241,5	32,4	143,1	249,6	529,0	150,2	423,5	1943,6	313,5	920,9	6424,4	1228,8	551,6	10136,0	79241,9	112122,4
ITA	6	1,2	0,5	4,2	18,9	29,8	11,2	16,3	18,3	34,5	14,4	21,1	14,4	235,7	29,6	136,2	246,8	500,2	147,8	386,3	1856,3	116,1	903,1	5856,2	827,9	557,9	9710,7	77026,1	115814,0
ITA	9	1,2	0,5	4,2	8,9	29,8	11,2	17,2	18,4	35,2	14,0	22,2	35,0	237,3	30,6	136,8	236,3	494,2	148,9	380,0	1863,8	238,0	937,4	6206,1	896,0	548,9	9878,5	77976,1	123677,2
ITA	12	2,6	1,0	4,0	8,9	29,8	11,2	20,3	16,9	32,3	12,0	19,5	11,6	248,5	26,8	123,9	210,9	481,9	138,8	353,0	1828,0	116,1	814,0	5585,4	633,7	581,2	9570,4	76678,0	129823,2
ITA	18	3,3	1,8	3,4	8,9	29,8	11,2	21,5	14,0	30,8	7,5	17,1	9,6	270,0	21,5	100,9	137,8	474,3	119,0	365,6	1677,5	116,1	690,0	5263,4	592,0	581,5	8611,0	72733,7	122888,5
ITA	24	3,1	1,1	3,2	8,9	30,1	11,2	20,2	13,7	31,0	5,6	17,6	10,4	286,5	19,0	93,9	103,7	490,8	115,8	385,7	1654,2	116,1	651,1	5011,0	780,8	658,9	8623,6	75340,6	133587,0
ITA	30	4,1	1,1	3,0	8,9	32,7	11,2	24,7	13,9	32,1	4,6	17,2	10,4	313,8	17,1	89,4	87,4	481,9	117,0	370,7	1576,5	116,1	633,0	4836,1	784,8	692,5	8633,5	76350,4	147694,3
ITA	40	3,9	1,1	3,2	8,9	30,0	11,2	21,7	13,6	31,7	4,8	16,0	9,6	309,5	17,6	89,8	91,2	441,2	113,6	361,5	1627,9	116,1	641,7	5177,1	726,7	566,1	8721,7	75582,9	137518,7
ITA	50	1,2	1,0	5,4	8,9	29,8	11,2	39,6	11,1	27,0	6,4	13,3	12,2	324,0	25,2	98,6	117,9	262,6	90,4	228,5	2215,1	116,1	671,7	7953,6	551,8	324,1	8800,8	71063,6	63022,7
ITA	60	1,2	1,0	5,4	8,9	29,8	11,2	31,3	11,1	29,0	6,4	12,9	12,2	310,3	24,8	97,9	117,6	252,0	90,5	220,5	2223,4	116,1	663,6	7863,7	562,2	336,8	8812,9	70330,4	62471,3
GRD-2	1	1,2	0,5	6,5	8,9	29,8	11,2	25,6	26,8	56,1	53,9	52,6	22,5	157,7	116,7	188,7	284,4	497,4	449,4	200,9	1209,5	306,9	3298,0	5868,4	1232,9	337,2	19247,8	86505,4	93280,1
GRD-2	2	1,2	0,5	7,1	8,9	29,8	11,2	18,7	33,3	61,0	60,5	57,3	29,0	160,9	125,2	209,6	306,1	512,7	490,0	243,9	1265,5	238,2	3653,9	6089,4	1094,1	361,9	23019,4	99966,3	101894,9
GRD-2	3	1,2	0,5	7,1	8,9	29,8	11,2	13,7	33,7	58,6	60,3	58,0	28,3	147,4	124,8	210,1	306,7	512,1	493,1	251,0	1256,8	116,1	3642,3	5988,2	1001,8	342,6	23032,4	101530,2	101974,5
GRD-2	6	1,2	0,5	7,0	8,9	29,8	22,3	23,0	33,0	61,4	58,7	59,2	28,8	154,3	128,9	207,6	301,0	522,1	495,8	207,1	1202,9	116,1	3538,2	5865,2	993,5	364,9	22496,5	98775,0	106162,6
GRD-2	9	1,2	0,5	6,7	8,9	29,8	23,8	20,3	28,5	53,6	40,4	56,8	25,9	158,6	126,3	207,1	273,3	529,0	536,4	181,1	983,4	116,1	3559,7	5905,6	982,7	332,6	20313,3	92451,9	108544,3
GRD-2	12	1,2	1,1	7,4	8,9	29,8	33,7	23,2	36,7	74,8	68,2	64,4	26,0	158,9	198,6	244,7	375,7	586,2	634,7	149,9	1318,7	116,1	4248,3	6050,1	1252,0	334,1	29143,7	115647,5	115710,9
GRD-2	18	1,2	1,3	8,1	8,9	29,8	11,2	27,8	34,8	53,0	69,0	59,5	20,0	180,3	206,9	262,8	436,9	481,6	660,9	119,6	1459,5	116,1	4890,9	6812,8	1283,4	250,3	30007,2	121028,5	107092,9
GRD-2	24	1,2	1,3	8,5	8,9	29,8	11,2	23,4	42,9	51,0	78,0	65,8	23,8	181,7	197,4	275,7	465,2	432,4	655,6	93,1	1505,5	116,1	5229,4	7265,0	1109,5	193,6	38079,4	140201,0	92572,1
GRD-2	30	1,2	1,5	9,1	8,9	29,8	11,2	24,0	46,9	66,4	92,6	72,4	22,9	190,9	232,1	286,9	510,0	490,4	674,4	80,8	1615,6	116,1	5556,5	7564,5	1170,7	188,5	41019,2	148375,0	101315,6
GRD-2	40	1,2	1,5	9,3	8,9	29,8	11,2	30,3	41,3	59,5	87,8	77,4	22,7	198,7	232,4	289,4	516,2	494,3	678,4	74,8	1560,1	116,1	5566,5	7627,0	1085,2	197,2	37393,0	140347,4	95465,1
GRD-2	50	1,2	1,5	9,3	8,9	29,8	11,2	27,8	46,4	57,7	78,2	77,9	22,1	196,1	229,0	291,4	503,2	489,6	681,5	92,3	1504,3	116,1	5604,1	7634,9	1127,4	190,7	41067,5	147640,5	96505,1
GRD-2	60	1,2	1,4	8,7	8,9	29,8	11,2	29,3	43,4	66,6	80,9	79,8	23,7	191,2	242,1	282,0	487,5	496,5	636,2	73,0	1578,6	116,1	5221,8	7329,8	1108,9	221,9	37539,4	140838,5	107895,8
Branco		<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,3	<LQ	9,7	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1517,6	10,8	187,5	<LQ	233,8	<LQ	<LQ
Branco		<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,3	<LQ	6,2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1452,7	11,0	102,6	<LQ	231,7	<LQ	<LQ
Máximo		4,1	1,8	16,0	20,2	32,7	33,7	39,6	52,5	74,8	92,6	120,3	126,7	324,0	323,7	374,7	516,2	906,5	1198,4	1356,0	2431,4	3228,0	5604,1	10722,6	12242,2	34321,6	41067,5	148375,0	282868,4
Mínimo		1,2	0,5	1,0	8,9	29,8	11,2	0,2	0,2	0,9	0,4	5,7	3,3	4,3	6,3	11,0	24,6	45,7	9,6	21,1	203,3	116,1	174,6	350,0	127,3	8,9	78,7	8461,8	987,8
Limite de Quantif.(LQ)		2,3	0,9	0,7	17,8	29,8	22,0	0,4	0,5	0,8	0,8	4,6	3,0	1,7	12,6		2,6	16,8	1,7	42,2	11,0	232,2	124,0	3,6	11,8	17,9	23,3	149,8	1975,6
Ocorrência acima do LQ		5	23	100	7	3	3	106	89	107	97	87	106	108	72	108	108	108	108	98	108	37	108	108	108				