

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA CARACTERIZAÇÃO DA ATIVIDADE
ALFA E BETA TOTAL NAS ÁGUAS E SUA APLICAÇÃO EM DIFERENTES
SISTEMAS AQUÍFEROS

Matheus Felipe Stanfoca Casagrande

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto

Rio Claro (SP)
2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

MATHEUS FELIPE STANFOCA CASAGRANDE

**METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA
CARACTERIZAÇÃO DE ATIVIDADE ALFA E BETA TOTAL
EM ÁGUAS E SUA APLICAÇÃO EM DIFERENTES
SISTEMAS AQUÍFEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Rio Claro - SP

2016

551.49 Casagrande, Matheus Felipe Stanfoca
C334m Metodologia alternativa para caracterização da atividade
alfa e beta total nas águas e sua aplicação em diferentes
sistemas aquíferos / Matheus Felipe Stanfoca Casagrande. -
Rio Claro, 2016
114 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots.

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade
Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Daniel Marcos Bonotto

1. Hidrogeologia. 2. Radioatividade. 2. Germânio
hiperpuro. 3. HPGe. 4. Espectrometria gama. I. Título.

MATHEUS FELIPE STANFOCA CASAGRANDE

METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA
CARACTERIZAÇÃO DE ATIVIDADE ALFA E BETA TOTAL
EM ÁGUAS E SUA APLICAÇÃO EM DIFERENTES
SISTEMAS AQUÍFEROS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto (orientador)

Dra. María Gabriela Castillo Vincentelli

Dra. Juliana Galhardi

Rio Claro, 28 de Novembro de 2016.

Assinatura do aluno

assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

À minha família e meus pais, Domingos C. Casagrande e Elaine C. Stanfoca Casagrande, pelo apoio e auxílio durante toda a minha trajetória até aqui, reconhecendo o valor da educação e esforço como fatores fundamentais para o crescimento pessoal, mesmo sem abandonar a simplicidade e humildade que lhe são características.

Ao meu orientador Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto pela paciência e dedicação durante os dois últimos anos. Certamente essa convivência impactará, de forma positiva, o meu futuro profissional.

À FAPESP pela concessão da bolsa de Iniciação Científica referente ao processo número 2015/03974-1.

Aos meus amigos de graduação Igor, Felipe, Bruno, Cleberson e Ranieri pelas inúmeras pizzas consumidas nos momentos bons e ruins desses últimos seis anos. Tenho certeza que muitas ainda virão.

“A arte é a razão correta na execução de um trabalho”

(São Tomás de Aquino)

Resumo

Deteção da atividade alfa e beta total em águas é um procedimento essencial proposto pela Organização Mundial da Saúde (OMS) no contexto de regulamentações envolvendo águas para consumo humano e adotado em muitos países. Para tal, um método alternativo de análise desenvolvido no LABIDRO-Laboratório de Isótopos e Hidrogeoquímica, IGCE-UNESP-Rio Claro, São Paulo, Brasil, se baseia na caracterização combinada da atividade alfa e beta total através de contagem alfa envolvendo detector do tipo barreira de superfície e espectrometria gama com detector cintilador do tipo NaI(Tl). Apesar da viabilidade e utilidade do método, suas maiores desvantagens consistem na adoção de leituras não simultâneas e a necessidade de evaporação da amostra para a contagem das partículas alfa no resíduo depositado, o que poderia ser afetado pela salinidade da água analisada. O intuito desse trabalho é o emprego de detector gama de alta resolução do tipo germânio hiperpuro (HPGe) EG&G ORTEC para a caracterização simultânea da atividade alfa e beta total, cuja calibração em energia se baseou na utilização de fontes radioativas artificiais contendo ^{137}Cs , ^{60}Co , and ^{133}Ba . Posteriormente, calibrações em concentração, concentração de atividade e o cálculo da eficiência de detecção utilizando diferentes fontes radioativas foram desenvolvidas com base em radionuclídeos das séries de decaimento do ^{238}U , ^{232}Th e também pela desintegração do ^{40}K . O processo adotado possibilitou ainda a determinação da atividade alfa e beta total (sem as restrições associadas à metodologia prévia) em 108 amostras de água subterrânea oriundas de diversos sistemas aquíferos porosos da Bacia do Paraná e fraturados dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. Dentre os resultados obtidos, se destacam as atividades mais elevadas relacionadas a fontes inseridas no contexto de aquíferos fraturados associados a ortognaisses, rochas metassedimentares, migmatitos, pegmatitos e intrusivas alcalinas, especialmente aquelas localizadas nos municípios de Caxambu, Cambuquira, Lambari, São Lourenço, Serra Negra e Poços de Caldas.

Palavras-chave:

Metodologia alternativa. Alfa e beta total. HPGe. Águas.

Abstract

Detection of gross alpha and beta radioactivities in water is a mandated program in the context of drinking water regulations proposed by World Health Organization (WHO) and adopted by many countries. For this aim, an alternative method was developed at LABIDRO-Isotopes and Hydrochemistry Laboratory, IGCE-UNESP-Rio Claro, São Paulo, Brazil, comprising a combined protocol involving alpha counting through a surface barrier detector and gamma ray spectrometry with a NaI(Tl) scintillation detector. Despite the reliability and usefulness of the method, its major disadvantages consist on the adoption of non-simultaneous readings and on the need of evaporating the water and counting the alpha particles in the residue deposited on a planchet/disk, which is a procedure that may be affected by the sample salinity. A novel approach is described in this paper employing a EG&G ORTEC HPGe gamma rays detector for gross alpha and beta characterization as a simultaneous way, which was initially calibrated in energy using artificial ^{137}Cs , ^{60}Co , and ^{133}Ba radioactive sources. Then, it was calibrated in concentration, and activity concentration with the calculation

of the detection efficiency using different radioactive sources and radionuclides related to the ^{238}U and ^{232}Th decay series and ^{40}K disintegration. The adopted protocol allowed determine gross alpha and beta radioactivities (without the constraints of the previous technique) in 108 ground water samples from different porous and fractured aquifer systems belonging to the Paraná Basin and crystalline terrains in the states of São paulo, Minas Gerais and Mato Grosso do Sul. Among the obtained results, those from the context of fractured aquifers related to ortogneiss, migmatites, pegmatites and alkaline intrusives rocks showed the higher values of gross alpha and beta activities, specially those waters from Caxambu, Cambuquira, Lambari, São Lourenço, Serra Negra e Poços de Caldas municipalities.

Key words:

Alternative methodology. Gross alpha and beta. HPGe. Waters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização dos municípios de amostragem nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul.....	16
Figura 2: Série de decaimento do Urânio e Tório com indicação do tempo de meia vida dos diferentes radionuclídeos, segundo Ku (1976)	17
Figura 3: Mapa de localização da Bacia do Paraná. Fonte: Schneider (1974).....	25
Figura 4: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná segundo Milani <i>et al.</i> (2007). Nela é possível visualizar as seis diferentes supersequências, espessura máxima e ambiente deposicional de cada formação.....	26
Figura 5: Distribuição das unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo, segundo IPT (1981) e modificado por Perinotto et al. (2008).....	27
Figura 6: Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (SOARES, 2004)	30
Figura 7: Mapa de distribuição espacial dos municípios onde foram coletadas as amostras de água subterrânea e sua relação com os aquíferos e sistemas aquíferos aflorantes de parte do Sudeste e Centro-Oeste do Brasil e perfis esquemáticos do Estado de SP (IRITANI & EZAKI, 2012). Mapa base: ANA (2013).....	31
Figura 8: Mapa geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. Fonte: Doranti-Tiritan (2013), modificado de Ulbrich (1984); CPRM (1999).....	35
Figura 9: Faixa Alto Rio Grande com a Nappe Socorro-Guaxupé (Modificado de Campos et al., 1990 por Lazarini, 2008). Municípios: 1- Águas de Lindóia; 2- Lindóia; 3- Serra Negra; 4- Lambari; 5- Caxambu; 6- São Lourenço e 7- Cambuquira.	37
Figura 10: Mapa geológico da porção ocidental da Faixa Alto Rio Grande (CAMPOS NETO et al., 1990).	39
Figura 11: Modelo hipotético de circulação da água próximo às fontes, com a presença de brechas alcalinas (BEATO, 1999).	41

Figura 12: Amostragem de água da fonte Roxo Rodrigues (PATB08) localizada no parque das águas de Cambuquira-MG, com detalhe para o recipiente de polietileno onde foi mantida a amostra.	44
Figura 13: Comparação de espectros gama gerados a partir de detectores do tipo Na:I, CZT, CdTe e HPGe, com detalhe para a alta resolução desse último (RUSSO & VO, s.d.)	45
Figura 14: Aspecto geral do sistema espectrométrico instalado nas dependências da UNESPetro Rio Claro, com destaque para a blindagem maciça de chumbo na qual está inserida o detector (canto esquerdo).	46
Figura 15: Esquema geral do sistema que compõe o espectrômetro gama com detector HPGe (Modificado de Duarte, 2002) e dimensões do detector HPGe (imagem fora de escala)	47
Figura 16: Recipiente do tipo <i>Marinelli</i> de um litro utilizado na leitura das amostras de águas subterrâneas.	49
Figura 17: Fotopico gama referente ao ^{214}Bi de energia 609,31 keV (azul) comparado com o pico gerado pela radiação de fundo (BG) delimitado pela linha pontilhada vermelha	52
Figura 18: Espectro do padrão para calibração em energia com indicação dos picos de interesse	53
Figura 19: Espectro do padrão de urânio com indicação dos picos de interesse.....	55
Figura 20: Espectro do padrão de tório com indicação dos picos de interesse	57
Figura 21: Espectro do padrão de potássio com indicação do pico de interesse.....	58
Figura 22: Curva de calibração de energia com os radionuclídeos e suas respectivas energias	63
Figura 23: Curvas de calibração em concentração referente ao pico do ^{214}Bi de energia 1.120,19 keV	64
Figura 24: Curvas de calibração em concentração referente ao pico do ^{214}Bi de energia 1.764,49 keV	64
Figura 25: Curva de calibração em concentração referentes ao fotopico do $^{226}\text{Ra}/^{235}\text{U}$	65

Figura 26: Curvas de calibração em concentração referente ao pico do ^{228}Ac de energias 911,21 keV	66
Figura 27: Curvas de calibração em concentração referente ao pico do ^{228}Ac de energias 968,97 keV	67
Figura 28: Curva de calibração em concentração referente ao pico do ^{208}Tl (583,19 keV)	68
Figura 29: Curva de calibração em concentração referente ao pico do ^{208}Tl (2614,53 KeV)	68
Figura 30: Curva de calibração em concentração referente ao fotopico ^{224}Ra (240,986 keV) e adjacentes	69
Figura 31: Curva de calibração em concentração referente ao pico do ^{40}K (1460.830 KeV)	70
Figura 32: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{214}Bi (1120.19 keV)	71
Figura 33: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{214}Bi (1764.49 keV)	72
Figura 34: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico sobreposto do ^{226}Ra e ^{235}U	72
Figura 35: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao picodo ^{208}Tl (583 keV)	73
Figura 36: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{208}Tl (2614 keV)	73
Figura 37: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{228}Ac (911,21 keV)	74
Figura 38: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{228}Ac (968,97 keV)	74
Figura 39: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{224}Ra (240,986 keV)	75
Figura 40: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{40}K (1461 keV)	75

Figura 41 : Curva de eficiência de detecção (%) do sistema espectrométrico onde dois polinômios distintos foram ajustados em que “e” corresponde à energia e “eE” aos valores de eficiência de detecção.....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Concentração média de urânio em diversos tipos de rochas (ROGERS & ADAMS, 1969a).....	19
Tabela 2: Concentração média de tório em diversos tipos de rochas metamórficas e ígneas (ROGERS & ADAMS, 1969b).....	21
Tabela 3: Concentração média de tório em diversos tipos de rochas sedimentares (ROGERS & ADAMS, 1969b).....	22
Tabela 4: Concentração de potássio em diferentes rochas (HEIER & BILLINGS, 1969).....	23
Tabela 5: Emissões gama relacionadas ao decaimento <u>beta</u> das séries do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , cuja intensidade absoluta é maior que 1%. Dados segundo Chu et al (1999).....	50
Tabela 6: Emissões gama relacionadas ao decaimento <u>alfa</u> das séries do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , cuja intensidade absoluta é maior que 1%. Dados segundo Chu et al (1999).....	51
Tabela 7: Tabela de calibração de energia com os dados radionuclídeos, e suas respectivas energias, utilizados na calibração	53
Tabela 8: Picos gama e seus respectivos radionuclídeos utilizados na calibração em concentração e concentração em atividade do sistema espectrométrico.	55
Tabela 9: Valores de atividade específica utilizados para cada um dos radionuclídeos dos padrões. O valor referente ao ^{40}K é considerado “natural”, ou seja, leva em conta as frações isotópicas naturais dos diferentes isótopos do elemento (PEARCE 2008).....	58
Tabela 10: Dados de atividade (Bq) e atividade por massa ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) da fonte radioativa padrão de urânio	59
Tabela 11: Dados de atividade (Bq) e atividade por massa ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) da fonte radioativa padrão de tório	59
Tabela 12: Dados de atividade (Bq) e atividade por massa ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) da fonte radioativa padrão de potássio	60
Tabela 13: Lista de radionuclídeos utilizados na geração da curva de eficiência de detecção	61

Tabela 14: Dados de calibração em concentração referentes aos pico do ^{214}Bi de energia 1120,19	65
Tabela 15: Dados de calibração em concentração referentes aos pico do ^{214}Bi de energia 1764,49 keV	65
Tabela 16: Dados de calibração em concentração referentes ao fotopico do $^{226}\text{Ra}/^{235}\text{U}$	66
Tabela 17: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{228}Ac de energia 911,21 keV	67
Tabela 18: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{228}Ac de energia 968,97 keV	67
Tabela 19: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{208}Tl (2.614,53 KeV)	69
Tabela 20: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{208}Tl (583,19)	69
Tabela 21: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{224}Ra (240,986 keV)	70
Tabela 22: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{40}K	71
Tabela 23: comparação com resultados de atividade obtidos por outros autores em algumas das fontes analisadas. Os valores das duas colunas da extrema-direita representam os dados gerados nesse trabalho	79

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	12
1.1 Apresentação	12
1.2 Objetivos	15
1.3 Localização dos municípios de amostragem	15
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 A radiatividade no ambiente geológico	17
2.1.1 Urânio	18
2.1.2 Tório	20
2.1.3 Potássio	22
2.2 Contexto geológico e hidrogeológico da área estudada	24
2.2.1 Província Hidrogeológica do Paraná	24
2.2.1.1 Bacia do Paraná	24
2.2.1.2 Contexto estratigráfico da Bacia do Paraná no Estado de SP	27
2.2.1.3 Unidades aquíferas da Bacia do Paraná	30
2.2.2 Província Hidrogeológica do Escudo Oriental do Sudeste	34
2.2.2.1 Maciço Alcalino de Poços de Caldas	34
2.2.2.2 Hidrogeologia local	36
2.2.2.3 Faixa Alto do Rio Grande	36
2.2.2.4 Hidrogeologia local	39
3.0 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Pesquisa bibliográfica	43
3.2 Amostragem	43
3.3 Metodologia	45
3.3.1 Sistema espectrométrico gama e detector HPGe	45

3.3.2	Leitura das amostras	48
3.3.3	Radiação de fundo	52
3.3.4	Calibração do sistema em energia	53
3.3.5	Calibração do sistema em concentração	54
3.3.6	Calibração do sistema em concentração de atividade	58
3.3.7	Eficiência de detecção	60
3.3.8	Cálculo da atividade	62
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Calibrações	63
4.2	Curva de eficiência de detecção	76
4.3	Atividade alfa e beta total nas amostras	77
5.0	CONCLUSÕES	80
6.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
Anexo 1	Dados dos poços e fontes amostradas	90
Anexo 2	Cálculo de separação do ^{226}Ra	95
Anexo 3	Cálculo de separação do ^{224}Ra	97
Anexo 4	Resultados da atividade alfa e beta total	101

1.0- Introdução

1.1- Apresentação

Em muitas cidades brasileiras a água subterrânea tem sido uma fonte importante deste recurso natural para abastecimento da população e das atividades industriais e agrícolas. No Estado de São Paulo, unidade da federação mais populosa com 44.396.484 habitantes estimados (IBGE, 2015), 80% dos municípios contavam com os aquíferos para abastecimento no ano de 2006 (CETESB, 2007), com destaque para os aquíferos Guarani, Bauru, Taubaté, São Paulo e Tubarão (IRITANI e EZAKI, 2012).

Com o crescimento da população, e conseqüente maior necessidade do uso desses sistemas aquíferos para o abastecimento humano, fica nítida a importância de um controle da qualidade das águas subterrâneas em termos de caracterização química e biológica. O caráter radiológico destas águas naturais, por sua vez, também reflete o contexto geológico e geoquímico local e é caracterizado, essencialmente, pela presença de radionuclídeos das séries de decaimento naturais iniciadas pelos isótopos ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e do próprio ^{40}K , cujas concentrações anômalas são responsáveis pela geração de águas expressivamente mais radioativas em certas localidades, como é o caso de algumas fontes de Caxambu-MG, São Lourenço-MG, Águas da Prata-SP e Poços de Caldas-MG e outras famosas estâncias hidrominerais e com contexto geológico favorável à incorporação de certos radionuclídeos em seus sistemas hidrológicos (SZIKSZAY & TEISSEDE, 198; SZIKSZAY & SAMPA, 1982; BONOTTO, 2015).

A crescente presença de radionuclídeos nos recursos hídricos em decorrência de processos tecnológicos (por exemplo, mineração/processamento de minerais portadores de radioelementos ou uso de fertilizantes fosfatados), testes nucleares, descarga de efluentes em instalações nucleares, conflitos armados utilizando artefatos nucleares ou manuseio de fontes radioativas manufaturadas levou a Organização Mundial de Saúde a estabelecer em sua legislação atual (WHO, 2011) uma grande lista de radionuclídeos para os quais foram propostos valores de referência para a sua ingestão nas águas. Aqueles de ocorrência natural são em número bem inferior aos demais, citando-se, por exemplo, o ^3H , o ^{14}C e vários das séries de decaimento do ^{238}U (isto é, ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{210}Bi), do ^{235}U (isto é, ^{235}U , ^{227}Th , ^{231}Th , ^{231}Pa , ^{223}Ra) e do ^{232}Th (isto é, ^{232}Th , ^{228}Th , ^{228}Ra , ^{224}Ra).

Em 1928 foi formado o *International Committee on X Ray and Radium Protection*, hoje conhecido como *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, a qual, desde então, tem estabelecido os limites para a exposição (utilização e ingestão) a fontes de radiação (ICRP, 1980). Desde a primeira edição das diretrizes para a qualidade radiológica das águas visando o consumo, várias revisões ocorreram (ICRP, 1991), as quais têm sido levadas em conta pela Organização Mundial de Saúde em sua legislação.

A legislação atual da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2011) estabelece um nível de dose efetiva de referência expressa em sieverts (Sv) e correspondente a 0,1 mSv para o consumo humano anual de água baseado na ingestão de dois litros por dia. Esse valor corresponde ao recomendado por ICRP (1991) e Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1996), tendo sido aceito pela Organização Mundial da Saúde e seus Estados membros, Organização das Nações Unidas Para Alimentação e Agricultura e Comunidade Européia.

Em função do tempo de análise, custo, e peculiaridades das técnicas analíticas utilizadas para a detecção de radionuclídeos específicos, WHO (2011) tem recomendado testes iniciais envolvendo a caracterização da atividade alfa e beta total nas águas. Se os valores de referência propostos são ultrapassados, então, devem ser realizadas análises de radionuclídeos específicos. Quanto ao ^{40}K , alusão à sua presença nas águas foi efetuada por WHO (2011) para expressar a sua contribuição para a radioatividade beta total. Os níveis de triagem estabelecidos por WHO (2011) que conferem potabilidade da água do ponto de vista radiológico são valores de concentração de atividade que não excedem 0,5 Bq/L para a atividade alfa total e 1 Bq/L para beta total. Estes valores são os mesmos adotados pelo Brasil, conforme especificado na Portaria No. 2914 do Ministério da Saúde.

Devido à relativa simplicidade e custo-benefício, diversas técnicas de medição de atividade beta/alfa total em águas têm sido desenvolvidas e aplicadas em larga escala, de maneira a atender as recomendações de WHO (2011). Porém, uma questão importante nestas análises diz respeito às medidas da atividade alfa e beta total efetuadas nos resíduos secos das amostras (KELLY, 1980; ALLEY, 1993). O procedimento de calibração é crítico (IOS, 1990a, 1990b), pois erros analíticos de até 100% têm sido identificados na determinação da atividade alfa total, dependendo do tipo de padrão utilizado, por exemplo, ^{241}Am ou urânio

natural. Além disso, uma vez que as medidas são feitas no resíduo seco, um problema potencial surge relacionado com o processo de absorção: amostras que possuem maior resíduo seco tendem a absorver a radiação emitida antes que ela seja dirigida ao contador, o que ocasiona um decréscimo na eficiência da contagem da amostra, propiciando, assim, a geração de resultados “artificialmente” baixos (ALLEY, 1993).

BONOTTO *et al.* (2009) desenvolveram uma técnica combinada de espectrometria alfa e gama para a geração dos dados de radioatividade alfa e beta total, consistindo num método alternativo aos convencionalmente utilizados. A espectrometria gama utilizando detector de cintilação de NaI(Tl) tipo poço de 3”×3” foi usada para a geração dos dados de radioatividade beta total, pois, raios gama são frequentemente emitidos após decaimentos beta associados às séries radioativas naturais ou radionuclídeos artificiais. A técnica desenvolvida foi utilizada com sucesso no estudo da radioatividade de águas subterrâneas dos aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani no Estado de São Paulo (BONOTTO, 2011). Jobbágy *et al.* (2010) efetuaram um levantamento dos métodos disponíveis para a realização das medidas de radioatividade alfa e beta total nas águas, sugerindo uma utilização mais acentuada da técnica desenvolvida por BONOTTO *et al.* (2009) face ao seu potencial de emprego e ao aspecto de se tratar de outra maneira interessante e eficaz para o estudo radiológico de águas.

Para a determinação da radioatividade beta total atualmente tem sido utilizado o já mencionado detector de cintilação de NaI(Tl) tipo poço de 3”×3”, que apresenta eficiência de 1,3% e resolução (FWHM) de 123 keV no pico de 1,33 MeV do ⁶⁰Co. Contudo, o desenvolvimento dos materiais semicondutores, a partir da década de 1960, também teve implicações na área nuclear, onde passaram a ser empregados tanto na detecção de radiações gama quanto nas medidas de partículas carregadas (elétrons de alta energia, prótons, partículas alfa, partículas beta, etc.). Suas vantagens têm sido registradas por vários autores, sendo uma das principais a resolução espectroscópica superior (ANDERSON, 1961; EDWARDS, 1968) que tem mostrado um desempenho excelente para a análise de emissão gama quando comparado ao de outros detectores (ver, por exemplo, KHANDAKER *et al.*, 2012).

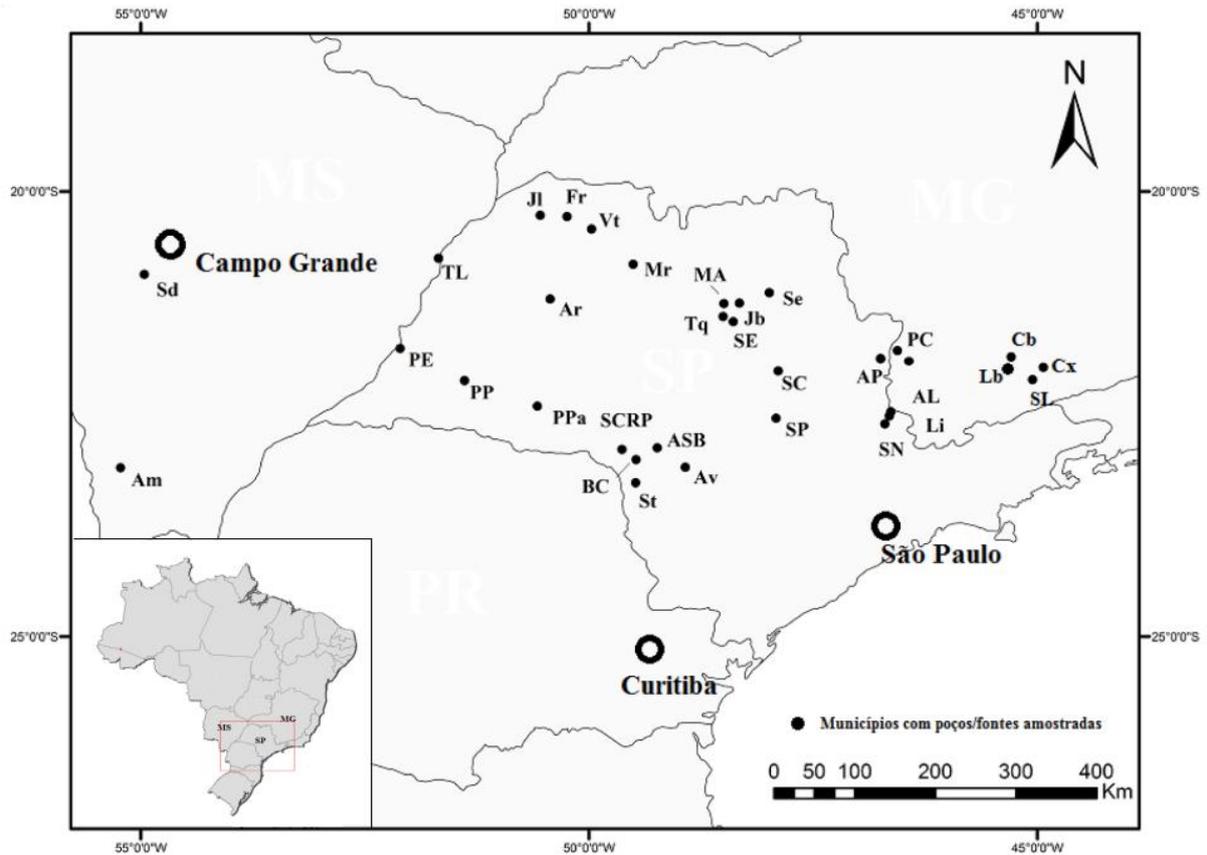
1.2- Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a caracterização da radioatividade alfa e beta total nas águas por intermédio de detector coaxial de germânio hiperpuro (HPGe), na medida em que se almeja aprimorar o método desenvolvido por Bonotto *et al.* (2009), bem como seu emprego na análise de amostras de águas oriundas de vários sistemas aquíferos do Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e sul de Minas Gerais.

1.3- Localização dos municípios de amostragem

A área de localização dos 33 municípios onde foram coletadas as amostras de água subterrânea se resume ao sul do Estado de Minas Gerais, porções oeste e central de São Paulo e centro-sul do Mato Grosso do Sul, estando inserida no polígono delimitado pelos paralelos $45^{\circ}00'00''W$ e $55^{\circ}00'00''W$ e pelas latitudes $20^{\circ}00'00''S$ e $25^{\circ}00'00''S$ (Figura 1). As localidades são de fácil acesso e servidas por algumas das principais rodovias do país a partir de capitais estaduais como São Paulo e Campo Grande, sendo alguns dos municípios intitulados como estâncias hidrotermais pertencentes ao Circuito das Águas Paulista e ao Circuito das Águas de Minas Gerais, para onde milhares de turistas se dirigem anualmente em busca de tratamentos terapêuticos através de suas fontes de água.

Figura 1: Localização dos municípios de amostragem nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul: Sd- Sidrolândia; Am-Amambaí; TL-Três Lagoas; PE- Presidente Epitácio; PP- Presidente Prudente; Ar- Araçatuba; Jl- Jales; Fr- Fernandópolis; Vt- Votuporanga; Mr- Mirassol; MA- Monte Alto; Tq- Taquaritinga; SE- Santa Ernestina; Jb- Jaboticabal; Se- Sertãozinho; Ppa- Paraguaçu Paulista; SCR- Sta. Cruz do Rio Pardo; BC- Bernardino de Campos; ASB- Águas de Santa Bárbara; Av- Avaré; St- Sarutaiá; SP- São Pedro; SC- São Carlos; AP- Águas da Prata; PC- Poços de Caldas; SR- Serra Negra; Li- Lindóia; AL- Águas de Lindóia; SL- São Lourenço; Cx- Caxambu; Cb- Cambuquira; Lb- Lambari.



2.0- Fundamentação Teórica

2.1- A Radioatividade no Ambiente Geológico

Radionuclídeos gerados na estratosfera ou troposfera como o ^3H , o ^{14}C e o ^{36}Cl têm sido utilizados em estudos hidrológicos, sobretudo para a datação de águas subterrâneas, ou seja, o primeiro (meia-vida de 12,3 anos) para estabelecer se a origem é recente, o segundo (meia-vida de 5730 anos) numa escala de tempo de ~ 40.000 anos atrás, e o terceiro (meia-vida de 301.000 anos) no estudo de aquíferos confinados onde é longo ($\sim 1-1,5 \times 10^6$ anos) o tempo de residência das águas subterrâneas.

Além destes radionuclídeos cosmogênicos, contribuem como fonte natural de radioatividade nas águas elementos que estão presentes na Terra desde a sua formação como o urânio, tório e potássio. A abundância crustal média do urânio corresponde a $2,5 \mu\text{g/g}$ (THORNTON, 1983), possuindo esse elemento dois isótopos primários, o ^{238}U (abundância de 99,3%) e o ^{235}U (abundância de 0,7%). Ambos são geradores de séries de decaimento radioativo (Figura 2), possuindo o ^{238}U um número maior de produtos de decaimento, muitos dos quais de longa meia-vida. O tório possui apenas um isótopo primordial, o ^{232}Th , contudo, ele é aproximadamente quatro vezes mais abundante que o urânio nas rochas crustais; esse nuclídeo também gera uma série de decaimento radioativo, a qual é relativamente simples quando comparada com a do ^{238}U .

Figura 2: Série de decaimento do Urânio e Tório com indicação do tempo de meia vida dos diferentes radionuclídeos.

	U-238				Th-232				U-235				
U	U-238 4,49Ga		U-234 248ka							U-235 0,71Ga			
Pa	↓ Pa-234 1,18m		↓							↓ Pa-231 34,3ka			
Th	Th-234 24,1 d		Th-230 75ka		Th-232 13,9Ga		Th-228 1,90a			Th-231 25,6h		Th-227 18,6d	
Ac			↓		↓ Ac-228 6,13h		↓			↓ Ac-227 22,0a		↓	
Ra			Ra-226 1622a		Ra-228 6,7a		Ra-224 3,64d					Ra-223 11,1d	
Fr			↓				↓					↓	
Rn			Rn-222 3,83d				Rn-220 54,5s					Rn-219 3,92s	
At			↓				↓					↓	
Po			Po-218 3,05m	Po-214 0,16ms	Po-210 138d		Po-216 0,16s	Po-212 0,3 s	65%			Po-215 1,8ms	
Bi			↓ Bi-214 19,7m	↓ Bi-210 50d	↓		↓ Bi-212 60,5m	↓				↓ Bi-211 2,16m	
Pb			Pb-214 26,8m	Pb-210 22,2a	Pb-206		Pb-212 10,6h	Pb-208	35%			Pb-211 36,1m	Pb-207
Tl							Tl-208 3,1m					Tl-207 4,79m	

O nível médio de potássio nas rochas crustais corresponde a cerca de 2,5%, porém, dos três isótopos de ocorrência natural, isto é, ^{39}K , ^{40}K e ^{41}K , apenas o ^{40}K é radioativo. As respectivas abundâncias isotópicas são 93,08, 0,012 e 6,9%, decaindo o ^{40}K por emissão β^- para ^{40}Ca e por captura eletrônica para ^{40}Ar .

2.1.1- Urânio

O Urânio é classificado como um metal pertencente ao grupo III B da tabela periódica (família dos Actinídeos). O elemento possui número atômico 92 e uma massa de 238,03 u, fazendo com que o urânio represente o elemento químico natural de núcleo mais pesado, sendo seu estado de oxidação situado entre +2 a +6, com as valências +4 e +6 se mostrando mais frequentes na crosta terrestre. O metal também é conhecido pela sua alta densidade de $19,05 \text{ g/cm}^3$ (20 °C) e ainda possui pontos de fusão e de ebulição a 1132° e 3818°C , respectivamente.

O fato do urânio, em relação ao material primordial, possuir um enriquecimento 230 vezes na crosta terrestre, enquanto que no manto este enriquecimento é somente 3 vezes, faz com que este elemento seja mais abundante nas camadas mais externas do planeta e seja classificado como um elemento litófilo (BONOTTO e SILVEIRA, 2006). Este fato, contrastante com as características do que se esperaria de um elemento litófilo, é explicado por Gabelman (1977) devido ao grande raio iônico deste elemento, a sua susceptibilidade de se combinar com flúor, cloro e oxigênio e também por formar combinações voláteis a temperaturas relativamente mais baixas.

Aproximadamente 100 minerais possuem o elemento urânio como constituinte essencial, sendo a Uraninita (UO_2) e sua variedade não cristalina (pechblenda), alguns dos principais minerais. Dentro do universo das rochas ígneas o urânio ocorre principalmente em minerais acessórios e possui a característica de formar soluções sólidas com elementos tetravalentes, como por exemplo, Ce, Zr e Th (BONOTTO, 2004). A ocorrência do elemento em questão se mostra mais acentuada em rochas ácidas como pegmatitos graníticos e rochas alcalinas. A Tabela 1 apresenta as concentrações médias de urânio em várias rochas dentro dos grupos ígneo, metamórfico e sedimentar.

Tabela 1: Concentração média de urânio em diversos tipos de rochas

Rochas Ígneas	U (ppm)
Graníticas	4,19
Gabróides	0,84
Ultramáficas	0,022
Eclogitos	0,2
Intrusivas Alcalinas	9,82
Extrusivas silicáticas	5
Basálticas	0,43
Rochas Metamórficas	U (ppm)
Anfibolito	3,5
Gnaisse	2,2
Paragnaisse	4,5
Granulito	4,9
Ortognaisse	3,6
Cordierita Gnaisse	5,8
Mármore	0,17
Filito	1,9
Xisto	2,5
Rochas Sedimentares	U (ppm)
Arenitos	1,48
Grauvacas	2,1
Arenitos Arcoseanos	1,5
Folhelhos	3,25
Bauxita	11,4
Bentonita	5
Calcários	2,19
Dolomitos	0,03 - 2
Fosfáticas	50 - 300
Evaporitos	<0,1

Fonte: Rogers e Adams (1969a)

O mesmo autor ressalta ainda que rochas sedimentares provenientes de ígneas contendo minerais resistatos enriquecidos em U e Th podem apresentar atividade radioativa anormal em decorrência da concentração destes elementos, já que a concentração média de U em sedimentos arenosos é de 1 µg devido à alta facilidade de lixiviação deste elemento dos interstícios ou da pechblenda e cofinita $[U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}]$ em condições oxidantes.

Ainda dentro do grupo das rochas sedimentares, Bonotto (2004) destaca presença de urânio disseminado nos minerais ortoquartzíticos de arenitos e a frequente ocorrência em rochas carbonáticas, onde preenche diminutas fraturas ou está disperso nos interstícios. O teor de urânio em folhelhos é diretamente proporcional ao teor de carbono da rocha, cujas partículas coloidais são responsáveis pela adsorção deste elemento (BONOTTO e SILVEIRA, 2006).

No que tange às rochas metamórficas, o teor de urânio dependerá do fator de concentração inicial deste elemento no protólito, que será alterado e remobilizado de acordo com o grau e processos metamórficos vigentes.

Rogers e Adams (1969a) sugerem que a abundância de urânio em águas continentais seja mais variável do que aquelas observadas nos oceanos (1 a 4 ppb) em detrimento de vários fatores que remobilizarão, ou não, o elemento em questão para os sistemas hídricos. Destacam-se, principalmente, o tipo de rocha lixiviada pela água e a taxa de fluxo e evaporação. De uma maneira geral, os mesmos autores afirmam que a concentração de urânio esperada para água doce é geralmente menor do que aquela observada nos oceanos.

2.1.2- Tório

O tório, assim como o urânio, é um elemento metálico pertencente ao grupo III B da tabela periódica (família dos Actinídeos). O elemento possui um número atômico igual a 90 e massa de 232,04 u, tendo sido descoberto no ano de 1828 pelo químico sueco Jöns Jacob Berzelius. Sua densidade é 11,7 g/cm³ e possui ponto de fusão a 1740 – 1760°C e de ebulição no intervalo de 4780 - 4800 °C. Sua geoquímica está intimamente associada com a do elemento urânio, entretanto, ambos podem ser geoquimicamente separados por processos sedimentares e superficiais (ROGERS & ADAMS, 1969b).

O elemento em questão é tetravalente na natureza, existindo como traço em rochas e formando solução sólida com minerais silicáticos, fosfáticos e óxidos, entretanto a solução sólida completa pode formar-se entre a torianita (ThO₂) e minerais ígneos, como a uraninita (UO₂) (LANGMUIR & HERMAN, 1980; ROGERS & ADAMS, 1969b). O fato de os

minerais de tório serem materiais bastante resistentes ao intemperismo seria um dos fatores da baixa concentração deste elemento no ambiente sendo, portanto, considerado um elemento praticamente insolúvel e imóvel em águas naturais (DUARTE, 2002). Tório é um constituinte menor em um grande número de minerais uraníferos e zirconíferos como branerita, absita, zircão, monazita e allanita (BOYLE, 1982), mas como elemento maior ocorre em apenas poucos minerais, como é o caso da torianita (ThO_2) e torita (ThSiO_4).

Sabe-se que a concentração de tório nas rochas ígneas é diretamente proporcional à quantidade de sílica e ao índice de diferenciação das mesmas. Segundo Boyle (1982) a concentração de tório em rochas sedimentares não segue uma tendência definida, exceto para alguns tipos de rochas argilosas e folhelhos com uma elevada concentração de alumina, onde o tório se mostra em maior abundância. Arenitos contendo minerais resistatos como zircão, allanita e monazita obviamente vão apresentar uma quantidade de tório maior do que aqueles arenitos mais puros (quartzosos). As Tabelas 2 e 3 apresentam as concentrações médias de tório em diferentes tipos de rochas.

Tabela 2: Concentração média de tório em diversos tipos de rochas metamórficas e ígneas

Rochas Ígneas	Th (ppm)
Graníticas	21,5
Ultramáficas	0,05
Eclogitos	0,37
Alcalinas Intrusivas	17,1
Basálticas	1,58
Gabróicas	3,84

Rochas Metamórficas	Th (ppm)
Anfibolito	5
Gnaise	6,4
Paragnaisse	21
Granulito	5,5
Ortognaisse	21,8
Cordierita Gnaise	0,03
Mármore	5,5
Filito	7,5
Xisto	10

Fonte: Rogers e Adams (1969b)

Tabela 3: Concentração média de tório em diversos tipos de rochas sedimentares

Rochas Sedimentares	Th (ppm)
Arenitos	0,7
Areia de Praia Atlântica	9,5
Grauvaca Vulcânica	2,6
Arcóseos	5
Folhelhos	11,8
Bauxita	48,9
Bentonita	24
Calcários	1,75
Fosfáticas	1 a 5

Fonte: Rogers e Adams (1969b)

2.1.3- Potássio

O Potássio é o elemento metálico de número atômico 19 na tabela periódica, pertencente ao grupo I A (metais alcalinos). Sua massa atômica corresponde a 39,1 u e densidade $0,87 \text{ g/cm}^3$, possuindo ainda pontos de fusão e ebulição a $63,7$ e 760°C , respectivamente. Conforme supracitado, o elemento perfaz 2,5% das rochas supracrustais do planeta, fazendo com que o potássio esteja presente como constituinte principal em diversos minerais formadores de rocha, como ortoclásio, sandina e microclínio, além de formar solução sólida completa entre sanidina/ortoclásio e plagioclásio sódico (albita) a altas temperaturas. Outros minerais importantes que possuem potássio em sua estrutura são: silvita, carnalita, carnita, salitre, muscovita, flogopita, biotita, lepidolita, apofilita, illita, carnotita, polialita, alunita, etc.

Segundo Duarte (2002), feldspato potássico, illita (mica potássica) e glauconita são os principais minerais portadores de potássio em areias e arenitos (impuros). Ainda dentro do grupo das rochas sedimentares, as rochas argilosas e folhelhos geralmente apresentam concentrações consideráveis de potássio em decorrência da abundância de minerais argilosos constituintes. A Tabela 4 apresenta a porcentagem do elemento potássio em diferentes rochas, com destaque na concentração para os granitoides, rochas alcalinas e sedimentares argilosas.

Tabela 4: concentração de potássio em diferentes rochas

Rochas Ígneas	K (%)
Granitos	3,4
Granitos Cálcio-Alcalinos	4,53
Alcali Granitos	4,26
Granitos Peralcalinos	3,49
Granodioritos	2,5
Tonalitos	1,5
Sienitos	3,73
Monzonitos	3,5
Dioritos	1,4
Gabros	0,6
Kimberlitos	0,97
Riólitos	3,8
Traquitos	4,76
Fonólitos	44
Andesitos	1,8
Basaltos	1,26

Rochas Sedimentares	K (%)
Arenitos	1,48
Sedimentos Argilosos	2,81
Folhelhos	2,45
Calcários	0,31

Fonte: Heier e Billings (1969)

Em águas subterrâneas a concentração de potássio pode ser relacionada pela taxa de intemperismo dos minerais de potássio (feldspatos potássicos, principalmente). Segundo Cocco *et al.* (1969) a concentração deste elemento também é dependente da taxa de formação de minerais estáveis de potássio (como é o caso da illita), disponibilidade de trocas em argilominerais e suprimento de soluções intersticiais.

2.2- Contexto geológico e hidrogeológico da área de estudo

2.2.1- Província Hidrogeológica Paraná

A Província Hidrogeológica Paraná está situada na porção mais meridional do país e corresponde à Bacia sedimentar de mesmo nome (MENTE, 2009). É nela que estão situados a maioria dos poços amostrados, em especial em municípios localizados no oeste do Estado de São Paulo. Nos itens abaixo seguem informações acerca do contexto geológico da bacia, bem como os sistemas aquíferos associados.

2.2.1.1- Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é tida como uma bacia intracratônica fanerozóica com uma área de aproximadamente 1500000 km² que se estende pelo centro-sul do Brasil (estados do Centro-Oeste, Sul, Minas-Gerais e São Paulo) até porções do norte da Argentina, Paraguai e Uruguai (SCHNEIDER et al., 1974) (Figura 3). Suas dimensões também compreendem um formato alongado segundo a direção NNE-SSW e paralelo à drenagem do Rio Paraná, que dá nome à bacia (QUINTAS et al., 1997). Em termos de espessura, a bacia atinge cerca de 7 mil metros na região da calha do rio homônimo, correspondendo ao depocentro da sinéclise (MILANI et al., 2007). Sua evolução é alvo de vários trabalhos e, segundo Milani et al. (2007), seria produto de flexura litosférica por sobrecarga tectônica que foi propagada devido ao desenvolvimento de calha de antepaís na porção ocidental do Gondwana. Já Fúlfaro et al. (1982) admitem um conjunto de calhas aulacogênicas como precursoras da sedimentação cratônicas e Zalán et al. (1990) apontam que a subsidência da bacia teria relações com contrações térmicas que sucederam o tectonismo do Ciclo Brasileiro.

A Bacia é caracterizada por seis supersequências reconhecidas por Milani et al. (2007): Supersequência Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), que compreende as Formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria; Supersequência Paraná (Devoniano), com as Formações Furnas e Ponta Grossa; Supersequência Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico) com o Subgrupo Itararé e as Formações Dourados, Tatuí, Rio Bonito, Palermo, Irati, Corumbataí, Serra Alta, Teresina, Pirambóia, Rio do Rastro e Sanga do Cabral; Supersequência Gondwana II (Meso a

Neotriássico) que abrange a Formação Santa Maria; Supersequência Gondwana III (Neojurássico a Eocretáceo) com as Formações Botucatu e Serra Geral e finalmente a Supersequência Bauru (Neocretáceo) que compreende os Grupos Bauru e Caiuá (Figura 4) As três primeiras sequências compreendem como sedimentações definidas por ciclos transgressivos e regressivos ocasionados pelo nível do mar durante o Paleozóico e os demais superciclos corresponderiam sequências sedimentares continentais com rochas vulcânicas associadas, segundo o mesmo autor.

Figura 3: Mapa de localização da Bacia do Paraná.



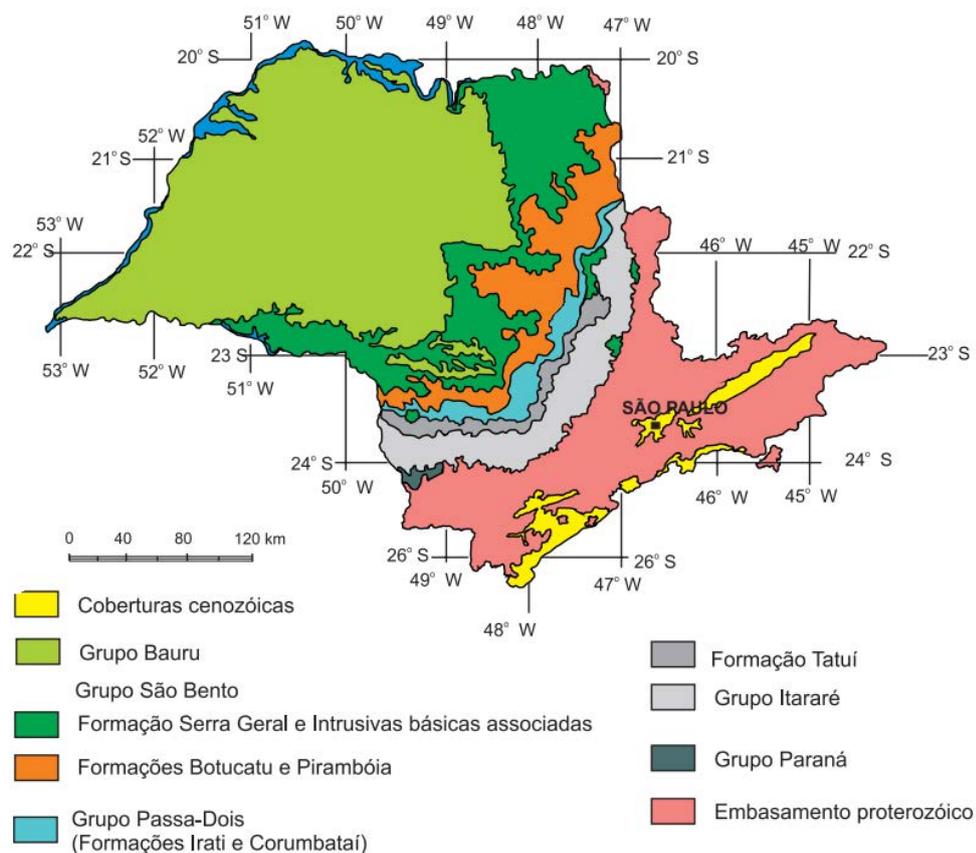
Fonte: Schneider (1974)

Em termos estruturais, a Bacia do Paraná apresenta marcantes feições lineares: NW-SE, NE-SW e E-W, sendo que as duas primeiras, e mais importantes, constituem falhas simples ou extensas zonas de falhamentos (ZALÁN et al., 1990). As falhas orientadas segundo NW-SE são entendidas como reativações durante o processo de ruptura do Gondwana (Juro-Cretáceo) e foram caminho preferencial para a extrusão do magma basáltico da Formação Serra Geral e instalação de corpos ígneos intrusivos, diferentemente das zonas de falhas NE-SW, que são caracterizadas pela menor ocorrência de diques básicos e pelo caráter transcorrente associado, além de estarem associadas a estruturas regionais como o Arco de Ponta Grossa. A direção E-W, por sua vez, é o conjunto de feições menos compreendidas, entretanto são paralelas às fraturas oceânicas, o que levaria à relacioná-las com o desenvolvimento do Atlântico Sul (ZALÁN et al., 1990).

2.2.1.2- Contexto estratigráfico da Bacia no Paraná no Estado de São Paulo

A grande maioria dos poços das amostras de águas subterrâneas utilizadas neste trabalho se situa em municípios do oeste e centro paulista, nas províncias geomorfológicas que Almeida (1964) nomeia como Planalto Ocidental, Cuestas Basálticas e Depressão Periférica. Apenas três amostras de água subterrânea são provenientes de poços localizados no estado vizinho de Mato Grosso do Sul, embora também façam parte do mesmo contexto geológico. Devido à grande profundidade dos poços, alguns atingindo cerca de três mil metros de profundidade, várias unidades geológicas da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo são identificadas nos testemunhos (ver Anexo 1). De uma maneira geral, são relacionados: Grupo Itararé, Grupo Guatá (Formação Tatuí), Grupo Passa Dois (compreendido pelas formações Irati e Corumbataí), Grupo São Bento (formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) e Grupo Bauru. A Figura 5 mostra a distribuição espacial dessas unidades no Estado de São Paulo.

Figura5: Distribuição das unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo.



Fonte: IPT (1981), modificado por Perinotto et al. (2008).

O Grupo Itararé, de idade Neocarbonífero ao Eopermiano, é composto por litologias relacionadas à ambiente glacial: diamictitos maciços e estratificados com seixos e blocos de litologias múltiplas e arenitos maciços ou com ondulações, relacionados à sedimentação turbidítica (MILANI et al., 2007). A Formação Aquidauana é considerada para alguns autores como uma unidade crono-correlata ao Grupo Itararé com afloramentos frequentes na borda oeste da bacia, sendo que trabalhos de França e Potter (1988) a consideram como uma formação pertencente a este grupo. De forma mais restrita em território paulista, os arenitos fluvio-marinhos do Eordoviciano da Formação Furnas, sotopostos ao Grupo Itararé, possuem afloramentos restritos à região de Itararé (MILANI et al, 2007).

A Formação Tatuí, do Eopermiano, possui discordância erosiva em sua base e é dividida em dois membros por Soares (1972). O membro inferior é descrito por siltitos, ocasionalmente laminados, de coloração comumente marrom-arroxeadada com ocorrências restritas de arenitos. O membro superior também é composto por siltitos, entretanto sua coloração é descrita como cinza-esverdeada. Lentes de arenitos de granulação média a grossa são comuns neste membro e podem apresentar marcas de ondas e estratificações cruzadas.

A Formação Irati compreende folhelhos, argilitos cinza escuro, folhelhos pirobetuminosos e calcários que se desenvolveram em um ambiente com circulação de água restrita no Neopermiano, segundo trabalhos de Schneider et al. (1974). É comumente subdividida em dois membros: Taquaral (base) e Assistência (topo). O primeiro é composto por uma sequência de argilitos e folhelhos cinza escuros com gradação para uma coloração mais clara e siltitos que possuem discordância erosiva em sua base e concordante no contato superior (SCHNEIDER et al., 1974). Já o Membro Assistência é descrito pelo mesmo autor como folhelhos cinza escuros, pretos pirobetuminosos com camadas e níveis de calcários dolomíticos.

A Formação Corumbataí, por sua vez, é datada do Neopermiano e constituída predominantemente por argilitos e siltitos de coloração cinza escuro na porção basal da formação. A parte superior é descrita como sendo composta por argilitos, folhelhos e siltitos roxos avermelhados com intercalações de bancos carbonáticos e arenitos finos (SCHNEIDER et al., 1974). Seu contato com a Formação Pirambóia (unidade sobreposta) é tido como discordante por Zaine (1994).

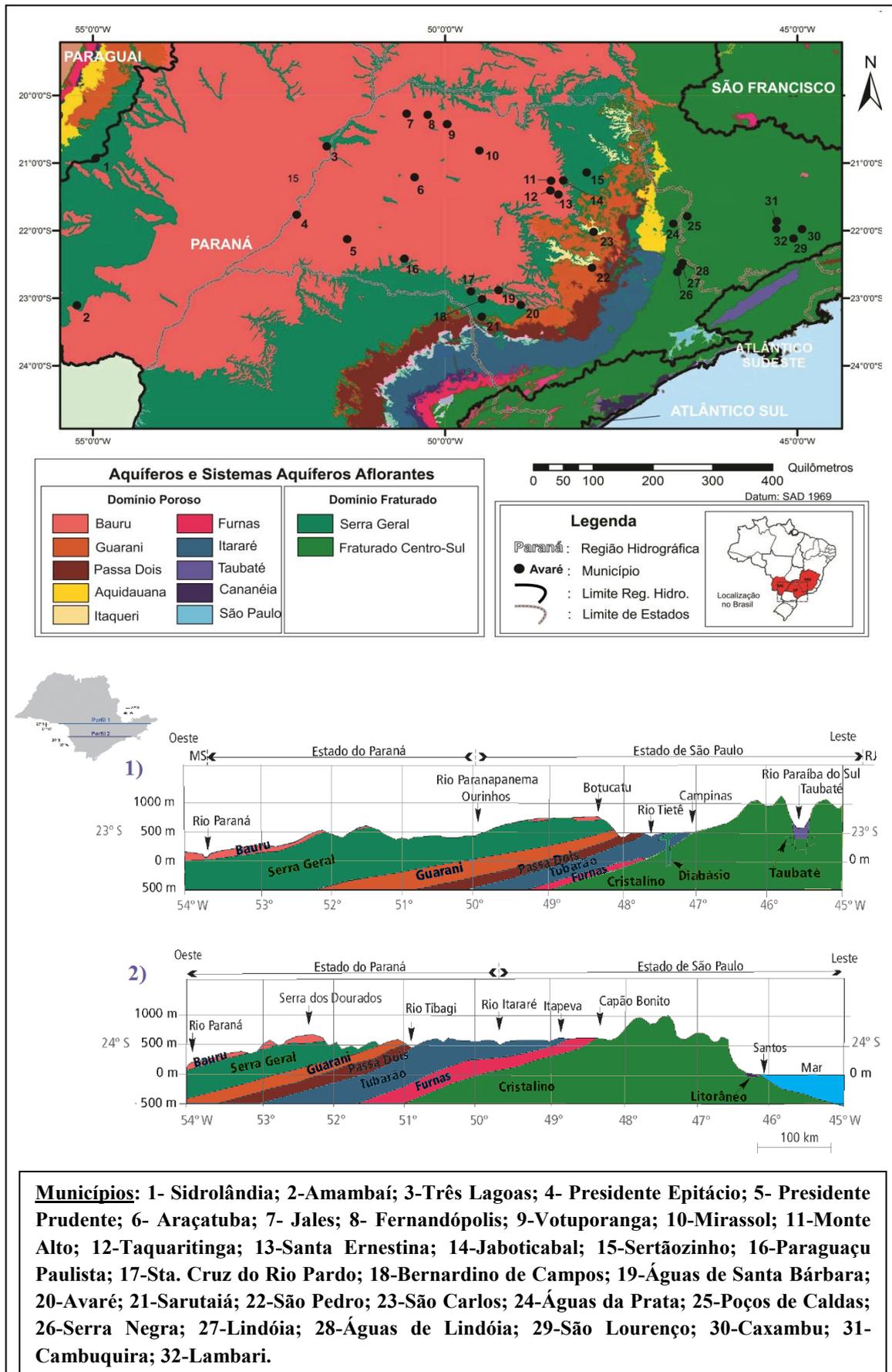
A Formação Piramboia (Triássico) é caracterizada por arenitos flúvio-eólicos de coloração esbranquiçada, amarela e vermelha, possuindo grãos polidos a subangulares a subarredondados de granulação média a muito fina (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI et al., 2007). Schneider *et al.* (1974) descreve ainda ocorrências locais de finas camadas de argilitos, siltitos e arenitos conglomeráticos. Seu ambiente de deposição é tido pelo mesmo autor como continental-fluvial, com depósitos de rios meandantes associados a lagoas em condições climáticas oxidantes.

A Formação Botucatu (Neojurássico a Eocretáceo) compreende arenitos róseos a vermelhos de granulação média a fina, normalmente bimodais, grãos arredondados e aspecto fosco e ocorrência de estratificações plano-paralelas e presença de arenitos argilosos mal selecionados em sua porção basal (SCHNEIDER et al., 1974). Segundo Milani *et al.* (2007) a unidade exibe ainda estratificações tangenciais bastante comuns que seriam indicativos de ambientes desérticos. Schneider *et al.* (1974) caracterizam o contato inferior com a Formação Piramboia e o superior com a Formação Serra Geral como concordante e discordante, respectivamente.

A Formação Serra Geral (Neojurássico ao Eocretáceo) é tida como produto de intenso magmatismo em fissuras relacionado à separação do supercontinente Pangea (MILLANI et al., 2007). São comuns soleiras e diques de rochas básicas correlatas ao extravasamento e formação dos derrames que no Estado de São Paulo é bastante variável, podendo atingir mais de 1800 metros na região de Presidente Epitácio-SP (Leinz et al., 1966).

O Grupo Bauru, por sua vez, é a unidade siliciclástica neocretácea pós-basáltica e pertencente à Supersequência Bauru, cujo paleoambiente é caracterizado como semi-árido à desértico (MILANI et al., 2007). De uma maneira geral, essa supersequência é caracterizada por arenitos, arenitos argilosos, arenitos argilosos carbonatados, siltitos, argilitos e localmente conglomerados e calcários (FERNANDES, 2004). Em termos litoestratigráficos é cronorrelato ao Grupo Caiuá (passagem lateral gradual) e subdividido nas formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe (outrora denominada Formação Adamantina), Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente e Marília, enquanto que o Grupo Caiuá abrange as formações Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio (MILANI et al., 2007). Segundo Fernandes (2004), de todas as unidades citadas, apenas as Formações Goio Erê e Uberaba não são mapeadas no Estado de São Paulo, como pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 7: Mapa de distribuição espacial dos municípios onde foram coletadas as amostras de água subterrânea e sua relação com os aquíferos e sistemas aquíferos aflorantes de parte do Sudeste e Centro-Oeste do Brasil e perfis esquemáticos do Estado de SP.



O Aquífero Furnas possui uma exposição bastante restrita de 530 km² no sul do Estado de São Paulo, mais precisamente nas cercanias dos municípios de Itararé, Itapeva e Nova Campina. É relacionado aos arenitos da Formação Furnas. Essa unidade hidrogeológica é do tipo porosa granular com vazão explorável estimada em 10m³/h (CETESB, 2005). Embora pertença ao contexto da Bacia do Paraná, nenhuma das amostras coletadas neste trabalho contempla a unidade.

O Aquífero Tubarão é uma unidade porosa que aflora em uma faixa na região central do estado, inserindo-se na Depressão Periférica Paulista, com área próxima de 20.700 km². É composto pelas rochas sedimentares da Formação Tatuí e Grupo Itararé/Formação Aquidauana, o que o torna um aquífero extremamente heterogêneo em termos hidrológicos com vazão explorável variando localmente de 0 a 40 m³/h (CETESB, 2013). Em sua porção livre abrange municípios como Itapetininga, Casa Branca, Campinas e Itu, onde pode chegar a 800 metros de espessura (IRITANI & EZAKI, 2012). ANA (2013) subdivide a unidade em Aquífero Itararé e Aquífero Aquidauana, de acordo com as unidades geológicas homônimas.

As unidades do Grupo Passa Dois não perfazem um aquífero devido à predominância de rochas de baixa permeabilidade como folhelhos, siltitos e argilitos e sua incapacidade de fornecimento de água para grandes comunidades (IRITANI e EZAKI, 2012). Sua faixa de afloramento é bem estreita, com cerca de 6.900 km² na porção central de São Paulo e é uma unidade que separa os aquíferos Guarani e Tubarão. Segundo Iritani e Ezaki (2012), o aquífero é pouco explorado e estudado do ponto de vista hidrogeológico, embora localmente possa apresentar certa produtividade por falhamentos na rocha.

O Aquífero Guarani, por sua vez, é composto pelos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, cujo sistema é predominantemente confinado pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Sua área de afloramento no estado abrange cerca de 17.700 km² e é representa um dos maiores reservatórios de água subterrânea do mundo. DAEE (2005) o classifica como um aquífero granular, homogêneo e regionalmente livre na sua porção aflorante. Seu fluxo é, em geral, para oeste e as vazões na porção livre chegam a 80 m³/h. Nas porções confinadas os valores de vazão aumentam de leste para oeste, chegando a 360 m³/h (CETESB, 2013). Sua elevada capacidade de armazenamento e vazão é dada pela grande quantidade de poros interconectados em razão dos arenitos eólicos bem selecionados e homogêneos.

Por ser um aquífero confinado e ter águas que podem atingir até 60 °C, alguns clubes e parques do oeste paulista, como em São José do Rio Preto, utilizam suas águas para uso recreativo em estâncias turísticas (IRITANI e EZAKI, 2012).

O Aquífero Serra Geral é descrito como um sistema fraturado, formado pelos derrames de basaltos da Formação Serra Geral, com espessuras mais significantes nas porções centrais da bacia e aflorante em uma área de 31.900 km² no Estado de São Paulo, onde possui comportamento de aquífero livre (IRITANI e EZAKI, 2012). Segundo Coelho (1996) é caracterizado como um aquífero com características hidráulicas bastante heterogêneas e sua exploração geralmente ocorre associada a outros sistemas aquíferos da bacia, onde os poços mais profundos recebem contribuição de águas dos aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani. Segundo dados de vazão da CPRM (2014) o sistema possui valores que variam de 10 a 100 m³/h.

O Aquífero Bauru abrange uma área de aproximadamente 96.900 km² no Estado de São Paulo e é um dos sistemas mais intensamente explorados da Bacia do Paraná pela indústria, agricultura e abastecimento público devido à pouca profundidade dos poços e grande extensão areal (COELHO, 1996). Suas águas ocorrem regionalmente de forma livre podendo, localmente, se apresentar de forma semi-confinada ou confinada (DAEE, 2005).

É um aquífero litologicamente heterogêneo composto pelas rochas dos grupos Bauru e Caiuá, com interferência direta nas condições de armazenamento e circulação de águas. Esses fatores levaram à subdivisão do aquífero, segundo DAEE (1979), nas seguintes sub-unidades: Bauru Médio/Superior (Grupo Bauru) e Bauru Inferior/Caiuá (Grupo Caiuá), este último apresentando porosidade uniforme, maior permeabilidade e transmissividade com potencial de exploração com vazões entre 40 a 60 m³/h, enquanto que na Unidade Bauru essas vazões são caracterizadas como moderadas e variam de 10 a 20 m³/h (CPRM, 2014).

2.2.2- Província Hidrogeológica Escudo Oriental do Sudeste

A Província Escudo Oriental do Sudeste, juntamente com a Província Escudo Oriental do Nordeste, é definida como uma subdivisão de uma unidade hidrogeológica maior, a Província Escudo Oriental (MENTE et al., 1981). Nela predominam rochas cristalinas como gnaisses, xistos, migmatitos, granitos, quartzitos, etc. de diferentes contextos geológicos, em sistemas aquíferos do tipo fraturado com potencial hidrogeológico relativamente fraco (MENTE, 2009).

A amostragem de águas subterrâneas do presente trabalho abrange fontes e poços de alguns municípios do Estado de São Paulo e Minas Gerais inseridos no contexto da supracitada província hidrogeológica: Águas de Lindóia, Lindóia, Serra Negra, Águas da Prata (SP), Poços de Caldas, Caldas, Lambari, São Lourenço, Cambuquira e Caxambu (MG). Informações acerca da geologia regional e aspectos hidrogeológicos são tratados a seguir.

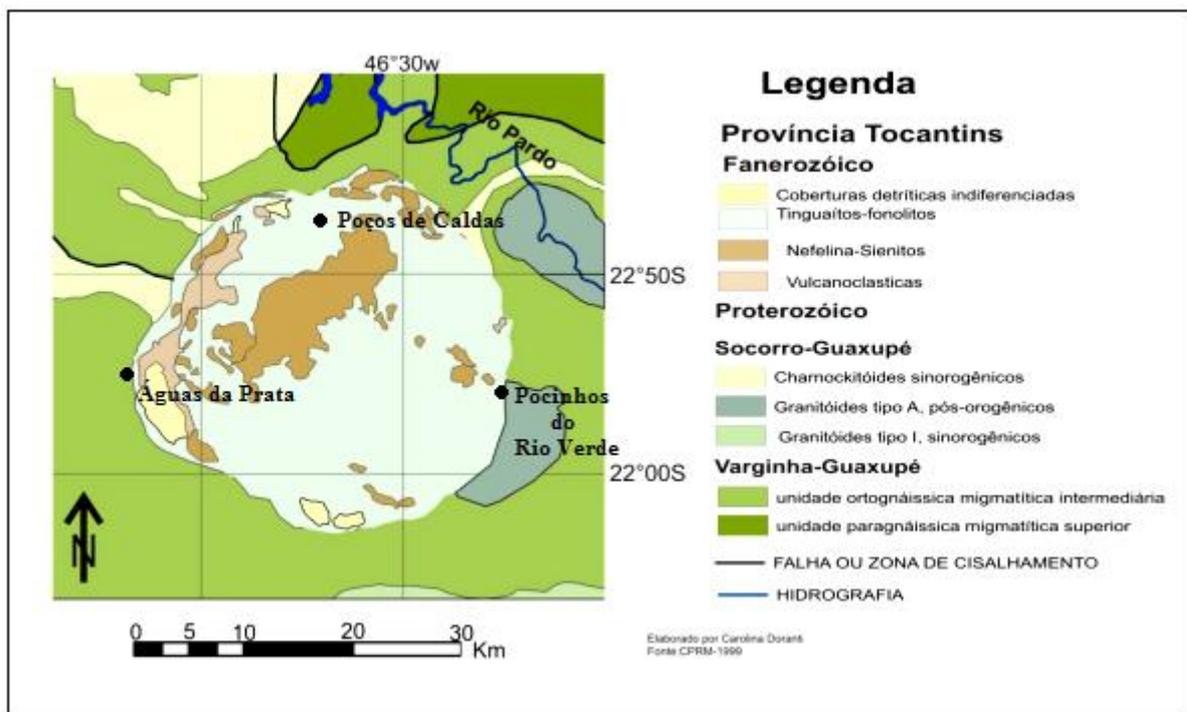
2.2.2.1- Maciço Alcalino de Poços de Caldas

Os municípios de Poços de Caldas, Águas da Prata e Caldas, localizados próximos da divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, estão inseridos no contexto geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. O Planalto de Poços de Caldas, como é tratado em termos morfológicos, é caracterizado como uma estrutura anelar composta por uma suíte de rochas alcalinas vulcânicas e plutônicas de idade cretácea (TEDESCHI et al., 2015). O sistema vulcânico é descrito como um dos maiores do mundo e se localiza nas proximidades da borda leste da Bacia do Paraná, mais precisamente nos arredores do município paulista de Águas da Prata. Os primeiros trabalhos na área datam do século XIX (1887) e projetos de mapeamento efetuados nas décadas seguintes, como os realizados por Ellert et al. (1959), auxiliaram no entendimento geológico da localidade. Desde então a região continua sendo alvo de diversas investigações científicas.

A suíte alcalina teria se intrudido em rochas do embasamento pré-cambriano, formado por gnaisses, migmatitos e plútons graníticos que, por sua vez, são relacionadas ao complexo

processo evolutivo dos cinturões Ribeira e Brasília em razão da interação entre os crátons São Francisco e Paranapanema (HASUI, 2012). Tedeschi et al. (2015) descreve a intrusão alcalina como um predomínio de tinguaítos e fonólitos isotrópicos, afaníticos a faneríticos de granulação fina com variações mineralógicas representadas por aegirina e pseudoleucita. De uma forma subordinada ocorrem nefelinas sienitos, lujaunitos e rochas piroclásticas representadas por brechas, aglomerados vulcânicos e tufos, estas últimas mais comumente encontradas na porção noroeste do complexo (Figura 8). Szikszay e Teissedre (1977) identificaram afloramentos significativos de arenitos e folhelhos no Vale do Quartel, próximo ao perímetro urbano de Águas da Prata e já na borda do maciço alcalino, com presença de estratificações cruzadas similares àquelas observadas nos arenitos da Formação Botucatu da Bacia do Paraná, além de rochas básicas representadas por intrusões de diabásios e sedimentos aluvionares nas proximidades do município paulista (Bittencourt e Taltasse, 1972).

Figura 8: Mapa geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas.



Fonte: Dorantí-Tiritan (2013), modificado de Ulbrich (1984); CPRM (1999).

2.2.2.2- Hidrogeologia local

As fontes investigadas nesse trabalho foram: Samaritana e Amorosa (distrito de Pocinhos do Rio Verde, Caldas); Frayha, Macacos, XV de Novembro e Quisisana (Poços de Caldas); e Villela e Vitória (Águas da Prata). De uma maneira geral são aquíferos fraturados associados às rochas alcalinas do Maciço de Poços de Caldas. Com base no mapa geológico da região, as duas primeiras localidades, e conseqüentemente suas fontes, estão inseridas em unidades geológicas caracterizadas por fonólitos e nefelinas sienitos, além de granitoides do embasamento nas margens do maciço alcalino e depósitos quaternários (TEDESCHI et al., 2015).

A fonte Villela, por sua vez, aflora ao pé de um paredão de arenito localizado no topo de uma escarpa próxima ao rio Quartel em Águas da Prata. Szikszay e Teissedre (1981) descrevem arenitos silicificados como sendo a litologia associada. Em um local bem próximo, a fonte Vitória surge ao pé de uma elevação de diabásio. A água de origem profunda emergiria por circulação ascendente através de fraturas de fonólitos e diabásios, recobertos por sedimentos aluvionares (SKIKSZAY e TEISSEDRE, 1981).

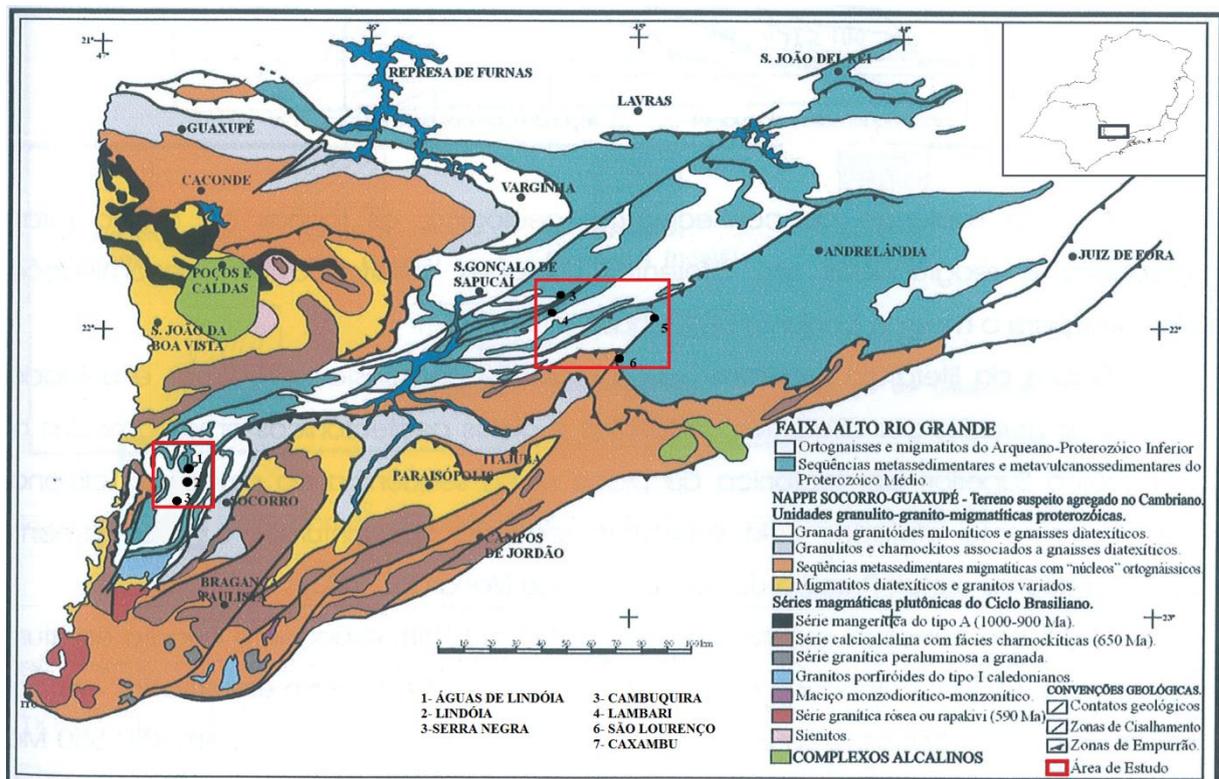
2.2.2.3- Faixa Alto Rio Grande

Outras duas áreas de estudo, nas quais estão inseridos os municípios paulistas de Águas de Lindóia, Lindóia e Serra Negra e também os municípios mineiros de São Lourenço, Cambuquira, Caxambu e Lambari, situam-se na Faixa Alto do Rio Grande, uma unidade tectônica mesoproterozoica marginal ao Cráton do São Francisco com fragmentos arqueanos e paleoproterozoicos retrabalhados durante o Ciclo Brasileiro (HASUI e OLIVEIRA, 1984; CAMPOS NETO, 1991). Em sua porção mais meridional possui orientação N-S com inflexão para a direção NE-SW à medida que se segue para nordeste da unidade. Essa faixa de dobramentos é delimitada por falhas e zonas de cisalhamento pelo Complexo Guaxupé a nordeste e pelo Complexo Socorro ao sul (Figura 9).

As unidades mais antigas, de idade arqueana a neoproterozoica, são representadas pelos complexos Amparo e São Gonçalo do Sapucaí e de maneira mais restrita pelos Gnaisses

Heliódora e Associação Máfico-Ultramáfica de Arcadas (Figura 10). O Complexo Amparo, com boas exposições na região da cidade homônima (porção SW da faixa), é caracterizado por migmatitos estromáticos e flebíticos exibindo deformação intensa e cortado por diques de biotita anfibolitos, além de ortognaisses afetados por anatexia. O Complexo São Gonçalo do Sapucaí, por sua vez, é descrito por horblenda-biotita gnaisses tonalito-granodioríticos e ocorre principalmente à NW da Falha de Três Corações (CAMPOS NETO et al., 1990). Trabalhos de Artur e Wernick (1984) classificam esse terreno antigo como sendo infracrustal ortoderivado. Na porção oriental da Faixa Alto do Rio Grande as unidades constituintes da crosta continental foram inicialmente definidas pelo conjunto de xisto verdes com metabasitos, metaultrabasitos e rochas metassedimentares associadas do Grupo Barbacena e também pelos granitoides gnáissicos do Grupo Mantiqueira (BARBOSA, 1954 apud PERROTA, 1991).

Figura 9: Faixa Alto Rio Grande com a Nappe Socorro-Guaxupé. Municípios: 1- Águas de Lindóia; 2- Lindóia; 3- Serra Negra; 4- Lambari; 5- Caxambu; 6- São Lourenço e 7- Cambuquira.



Fonte: Modificado de Campos Neto, 1990 por Lazarini, 2008

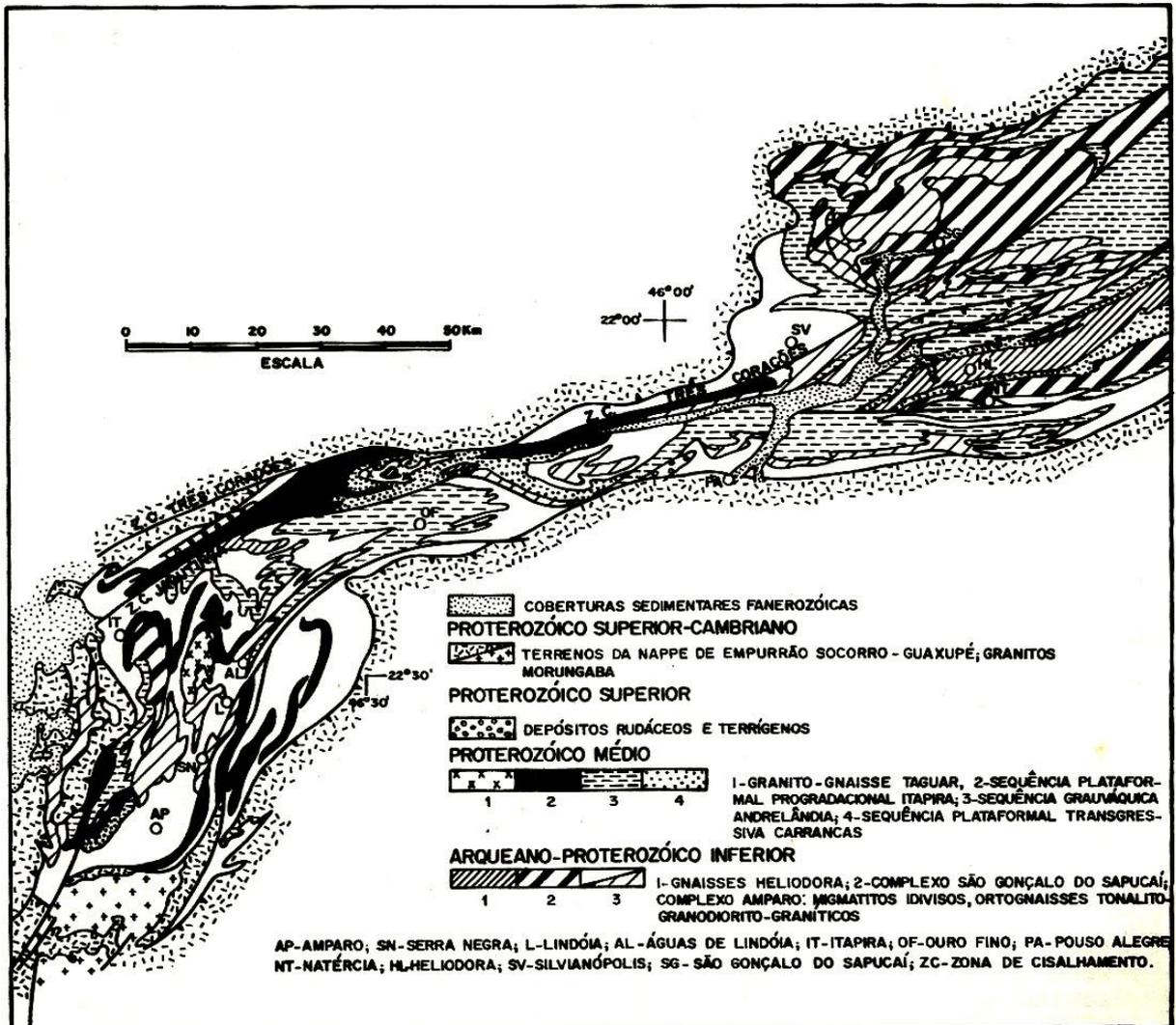
Coberturas metavulcano-sedimentares mesoproterozóicas alóctones recobrem o terreno ortognáissico-migmatítico supracitado e são definidas pelos grupos Andrelândia, São João Del Rei, ambos com equivalência estratigráfica reconhecida inicialmente por Ebert (1968 apud VASCONCELOS, 1988), e Grupo Itapira. Campos Neto et al. (1990), por sua vez, subdivide essas rochas metavulcano-sedimentares em três grandes sequências: Plataformal Transgressiva Carrancas, Grauváquica Andrelândia e Plataformal Progradante Itapira (Figura 10).

Na primeira sequência estão englobados quartzitos micáceos e puros, granada-muscovita-biotita xistos, gnaisses granolepdoblásticos a oligoclásio e sillimanita, hoblenda-piroxênio gnaisses e gnaisses bandados básico-intermediário, alternando composições dioríticas com transições calciossilicáticas e anfibolitos. A Sequência Grauváquica Andrelândia foi descrita pelo mesmo autor como sendo uma unidade composta por granada-biotita-plagioclásio gnaisses, gnaisses calciossilicáticos (mais frequente no topo da sequência), metagrauvas e anfibolitos. São comuns sillimanita, cianita e muscovita. Finalmente, a Sequência Plataformal Progradacional Itapira é caracterizada litologicamente por muscovita-biotita gnaisses quartzosos, muscovita quartzito, cianita-sillimanita-granada-biotita-muscovita-quartzo xistos, gonditos, calciossilicáticas e anfibolitos (CAMPOS NETO et al., 1990)

Corpos graníticos, como o granito-gnaisse Taguar, são mapeados na região sul da Faixa Alto do Rio Grande e a localização deste se dá, por exemplo, a oeste do município de Águas de Lindóia (MORAIS, 1999). Vasconcellos (1988) o descreve como magnetita-biotita-granito a ferro-hastingsita com todas as deformações identificadas na cobertura.

Do ponto de vista estrutural, a região mencionada sofreu ao longo do tempo uma evolução polifásica e policíclica com eventos que remontam do Arqueano até o Proterozóico Superior (CAMPOS NETO et al., 1990).

Figura 10: Mapa geológico da porção ocidental da Faixa Alto Rio Grande.



Fonte: Campos Neto et al., (1990).

2.2.2.4- Hidrogeologia Local

A região do município de Águas de Lindóia, assim como as vizinhas Lindóia e Serra Negra, está relacionada às rochas do Complexo Amparo/São Gonçalo do Sapucaí, Grupo Itapira, Granito-Gnaiss Taguar e depósitos aluvionares recentes (MORAIS, 1999). As fontes Madame Curie e São Roque, por sua vez, possuem suas litologias descritas como quartzitos e milonitos em sugências de fraturas N50-60W e N35E, respectivamente (DEL REY, 1989; YOSHINAGA, 1990). De maneira geral, a área dos municípios supracitados possui influência da Falha de Monte Sião, sendo que Del Rey (1989) relaciona a ocorrência de fontes à fraturas

de orientação N70-EW, N70W-EW e N10W-N30E, com áreas de recarga provavelmente limitadas a porções topograficamente mais elevadas e com circulação que pode atingir até 2.000 metros de profundidade.

A Estância Hidrotermal de Lindóia é representada neste trabalho pelas fontes Bioleve, São Benedito e São Jorge, com as duas últimas litologicamente associadas à biotita-gnaisses e migmatitos por Szikszay e Teissedre (1981). Já as fontes Italianos, São Carlos, Santa Luzia, Santo Agostinho, Brunhara, Laudo Natel e Sant'ana se localizam no município de Serra Negra e em termos geológicos se relacionam a gnaisses e migmatitos do Complexo Amparo, com presença de pegmatito na fonte São Carlos, em surgências através de fraturas orientadas preferencialmente segundo NS-N30E, N50-70W e N50-60E (DEL REY, 1989).

A região do Circuito das Águas do Estado de Minas Gerais se relaciona, geologicamente, com os ortognaisses, migmatitos e sequências metavulcanossedimentares da Faixa Alto Rio Grande e de maneira mais restrita com as unidades da Nappe Socorro-Guaxupé e abrange os municípios mineiros (com amostras coletadas) de São Lourenço, Caxambu, Cambuquira e Lambari com suas fontes de água geralmente agrupadas em parques públicos dentro dos limites urbanos.

De maneira geral, há o predomínio de aquíferos do tipo fraturado, livres a semiconfinados, seguidos de aquíferos intergranulares livres, em parte confinado, distribuídos ao longo das principais drenagens da região onde são identificados aluviões e também recobrimo o substrato rochoso (solos residuais) (BEATO et al., 1999), segundo modelo de circulação de água da Figura 11.

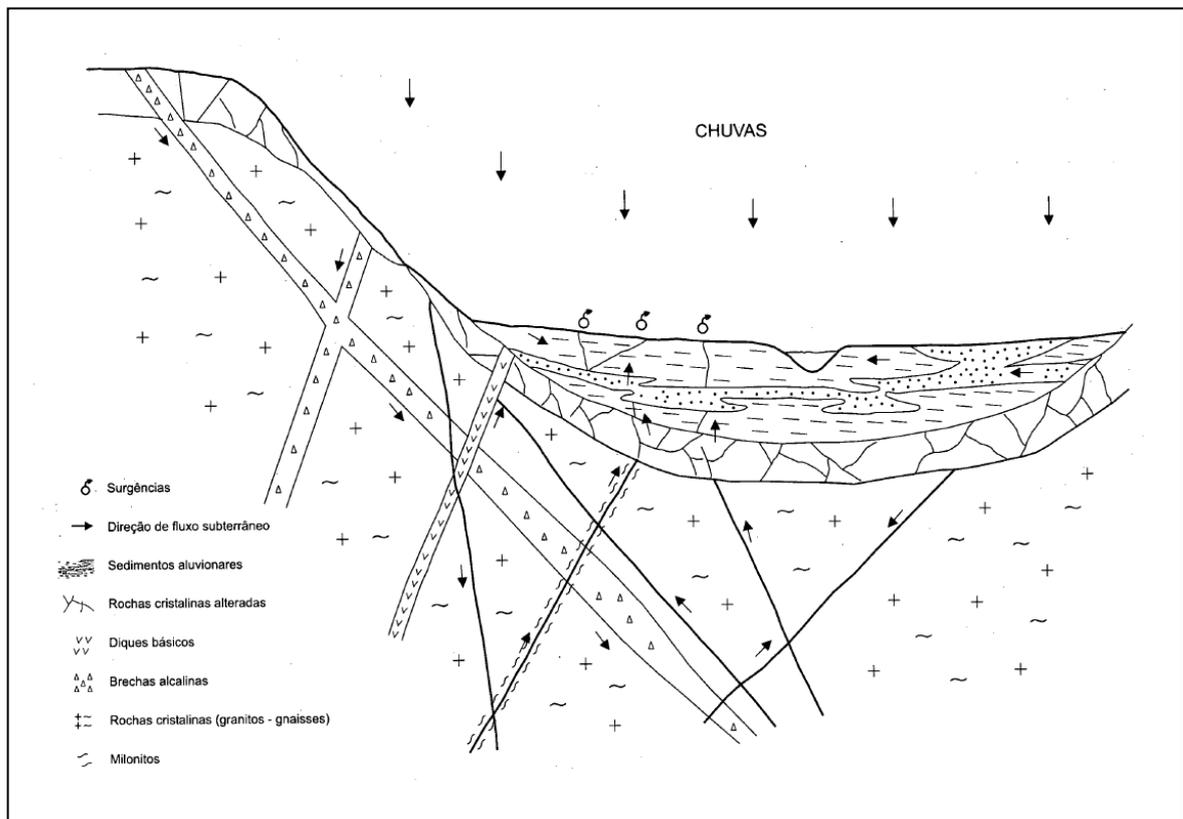
Em Cambuquira o parque das águas e as fontes Roxo Rodrigues, Comandante Augusto Ferreira, Fernandes Pinheiro, Souza Lima e Regina Weneck se situam nos domínios de aquíferos fraturados, descontínuos, restritos a juntas e fraturas e ampliados pela presença de aluviões e solos residuais (aquíferos intergranulares). A litologia é tida por xistos granatíferos e gnaisses saprolizados, quartzitos muscovíticos e raros níveis anfíbolíticos e veios pegmatóides, com fraturas N40-60W e N-S (BEATO et al., 1999).

O sistema hidrogeológico no qual estão inseridas as fontes do “Parque das Águas” de Lambari é basicamente o mesmo descrito em Cambuquira, mas litologicamente associado a

biotita gnaisses (granatíferos ou não) intercalados com metabasitos secundariamente cortados por veios pegmatóides do Grupo Barbacena e quartzitos puros e micáceos com intercalações de muscovitas xistos (BEATO et al., 1999). Foram amostradas águas dos poços 1, 2, 3, 4 e 5.

Os aquíferos descontínuos fraturados livres de Caxambu possuem sua litologia representada localmente por gnaisses com ocorrência de brechas alcalinas na forma de veios e alteradas por ação hidrotermal com cobertura aluvionar representada por um sistema aquífero intergranular (BEATO et al., 1999). Nas redondezas da cidade há um corpo quase circular, composto por traquitos, sienitos muito finos e brecha magmática, colocado em uma zona de cisalhamento subvertical (TROUW et al., 2013). As fontes cujas amostras foram analisadas neste trabalho foram: Dona Isabel/Conde D’Eu, Ernestina Guedes, D. Pedro II, Viotti, Mayrink e Duque de Saxe, localizadas no parque das águas situado na base do “Morro de Caxambu” e sobre planície aluvionar.

Figura 11: modelo hipotético de circulação da água próximo às fontes, com a presença de brechas alcalinas.



Fonte: Beato (1999).

A ocorrência de água mineral no parque das águas de São Lourenço, por sua vez, está inserida localmente num contexto de gnaisses intercalados por metabasitos e veios pegmatóides com o mesmo padrão de fraturamento observado em Cambuquira e ampla cobertura aluvionar. Rochas pertencentes ao Grupo Paraíba do Sul da Nappe Socorro-Guaxupé ocorrem bem próximo da área das fontes e são tidas por biotita-gnaisses, granitoides migmatizados passando a protomilonitos e milonito-gnaisses (BEATO et al., 1999). As fontes amostradas desta localidade são: 7 Bis, Sulfurosa, Alcalina, Primavera, Ferruginosa, Vichy e Número 6.

3.0- Material e Métodos

3.1- Pesquisa bibliográfica

A primeira etapa do trabalho compreendeu o levantamento da bibliografia relacionada à temática do trabalho. Foram obtidos artigos, periódicos, livros, mapas, dissertações e trabalhos acadêmicos envolvendo a caracterização radiológica de águas, metodologias analíticas, geologia e hidrogeologia das áreas abordadas pela pesquisa.

Para tal, foram utilizados os acervos bibliográficos da UNESP Rio Claro, bancos de dados online de trabalhos acadêmicos digitalizados oferecidos pelas principais universidades do país, além de sites especializados na divulgação e propagação do conhecimento científico na forma de artigos e relatórios técnicos.

3.2- Amostragem

Foram coletadas 108 amostras de águas subterrâneas de diferentes localidades dos estados de São Paulo, Minas Gerais e também do Mato Grosso do Sul, que abrangem uma série de sistemas aquíferos (ver Figura 7 e Anexo 1). Vários pontos de coleta se deram em áreas de fácil acesso e diretamente de torneiras comumente utilizadas como fonte de água pela população local, principalmente em alguns municípios considerados estâncias hidrotermais nos estados mencionados e que recebem anualmente inúmeros turistas à procura dessas fontes para os mais variados tratamentos terapêuticos e banhos de imersão. Outras amostras foram obtidas de poços tubulares que se prestam ao abastecimento urbano, em sua maioria administrados pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), em aquíferos como Guarani, Bauru e Serra Geral. As amostras de água foram, portanto, armazenadas em vasilhames de polietileno hermeticamente selados e não houve a necessidade de adição de nenhum preservativo (Figura 12).

Grande parte das amostras foi coletada durante trabalhos posteriores a este projeto, em atividades de campo que remetem aos anos de 2010 e 2011. Outras amostragens foram

efetuadas durante os meses de agosto e setembro de 2015, coincidente com o andamento deste projeto. As amostras foram armazenadas conforme os meios já supracitados e estocadas nas dependências do LABIDRO – Laboratório de Isótopos e Hidroquímica do Departamento de Geologia e Metalogenia do campus da Unesp Rio Claro, onde se encontram disponíveis para serem utilizadas.

Figura 12: amostragem de água da fonte Roxo Rodrigues (PATB08) localizada no parque das águas de Cambuquira-MG, com detalhe para o recipiente de polietileno onde foi mantida a amostra.



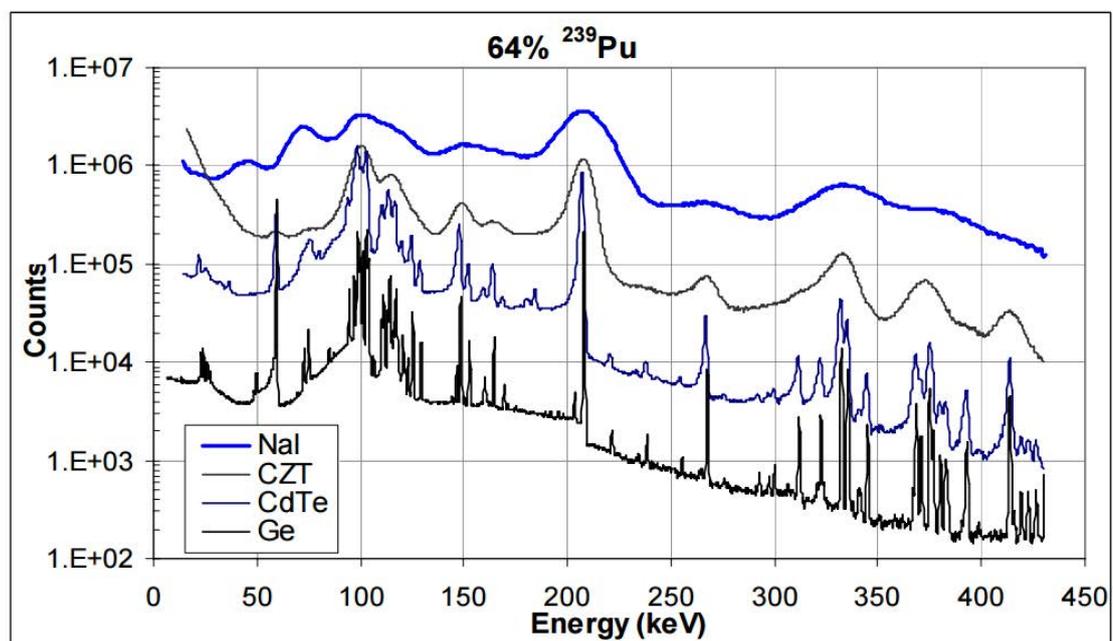
3.3- Metodologia

3.3.1- Sistema espectrométrico gama e detector HPGe

Os primeiros detectores semicondutores surgiram a partir da década de 60, fazendo com que as medições de radioatividade atingissem níveis de maior precisão e exatidão na área da física nuclear, especialmente quando comparados com sistemas de menor resolução, como é o caso dos detectores cintiladores (Figura 13). Detectores gama são amplamente empregados no âmbito das geociências e geofísica como importantes ferramentas no auxílio da prospecção de mineralizações, mapeamento geológico, tendo em vista a alta penetrabilidade e relativa facilidade de detecção das emissões gama, além de sua atuação no estudo quantitativo e qualitativo dos elementos radioativos em amostras minerais e de águas.

O sistema utilizado nesta pesquisa está instalado no UNESPetro - Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo, IGCE-UNESP-Campus de Rio Claro (Figura 14) e seu detector apresenta comprimento de 8,4 cm e diâmetro de 6,7 cm. Suas principais diferenças em relação ao espectrômetro gama baseado no detector de cintilação de NaI(Tl) são:

Figura 13: comparação de espectros gama gerados a partir de detectores do tipo Na:I, CZT, CdTe e HPGe, com detalhe para a alta resolução desse último.



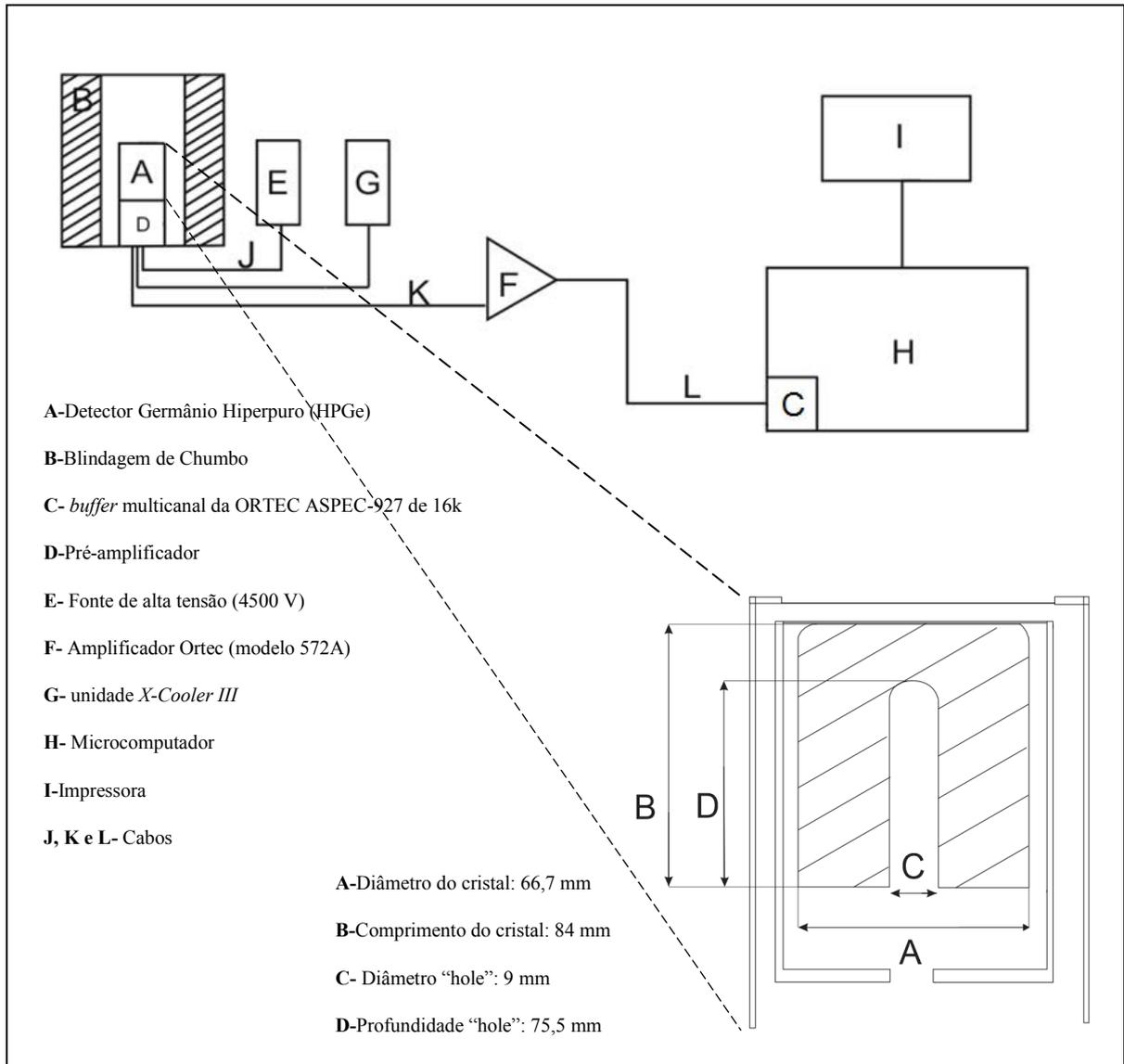
- Voltagem de operação negativa de 4500 V ao invés de positiva de 1000 V;
- Uso de unidade *X-Cooler III* para fornecer o resfriamento requerido pelo detector (77K nas CNTP);
- Emprego do *buffer* multicanal da ORTEC ASPEC-927 de 16k para a aquisição de dados, ao invés da placa ACE 2k da ORTEC;
- Eficiência de 63% e resolução (FWHM) de 2,1 keV no pico de 1,33 MeV do ^{60}Co .

Figura 14: aspecto geral do sistema espectrométrico instalado nas dependências da UNESPetro Rio Claro, com destaque para a blindagem maciça de chumbo na qual está inserida o detector (canto esquerdo).



A Figura 15 mostra o esquema geral do sistema que compõe o espectrômetro gama e o detector utilizados nesse trabalho:

Figura 15: Esquema geral do sistema que compõe o espectrômetro gama com detector e suas dimensões (imagem fora de escala) HPGe.



Fonte: modificado de Duarte (2002)

O sistema espectrométrico gama consiste basicamente em um detector, componentes eletrônicos que fazem a coleta e processamento dos sinais produzidos pelo detector e um software para que seja gerado graficamente o espectro de interesse. O sensor gama utilizado é, como já mencionado, o do tipo HPGe e se mantém acoplado a uma unidade de refrigeração *X-Cooler III* que garante uma temperatura de 77 K e viabiliza o bom funcionamento do sistema. Os detectores do tipo semicondutores, como é o caso, se baseiam na geração de pares elétron-lacuna para a detecção da radiação gama, sendo a energia da radiação incidente no detector proporcional ao número destes pares. O campo elétrico estabelecido no sistema

garante a migração dos pares elétron-lacuna para o ânodo e cátodo, gerando um sinal elétrico proporcional.

Os sinais elétricos gerados no detector passam pelo pré-amplificador e amplificador a fim de que sejam detectados. O *software* GammaVision da Ortec processa e gera visualmente um gráfico do espectro gama, onde no eixo das abscissas estão representados os canais (16383 ao todo) enquanto que o número de contagens emitidas nas transições nucleares é definido pelo eixo das coordenadas, sendo que a contagem total pode ser facilmente obtida pelo cálculo da integral definida do pico de interesse (área do pico). Cabe ao analista determinar o tempo de duração da análise, embora quanto maior o tempo, melhor a definição do pico no espectro, principalmente quando se trabalha com amostras com baixas atividades.

Com a utilização de detector gama de alta resolução, espera-se, de forma inequívoca, identificar um amplo espectro de radionuclídeos dissolvidos nas águas, o que geralmente não acontece com o detector de cintilação de NaI(Tl). Com práticas laboratoriais buscando meios mais ecológicos de uso e descarte de substâncias e reagentes químicos, é fundamental ressaltar que o método de análise referente a este projeto não faz necessário o emprego de reagentes químicos, como ocorre nos métodos que utilizam resinas cromatográficas, por exemplo.

O trabalho de Bonotto et al. (2009), empregando um detector gama do tipo cintilador de NaI(Ta), já havia demonstrado vários aspectos positivos da técnica gama implementada: baixo custo, identificação direta de certos radionuclídeos presentes na água e baixa absorção de raios gama pelos sais dissolvidos na própria amostra. Este último aspecto é bastante interessante quando se leva em conta as águas de salinidade mais elevada, cuja alta absorção de partículas beta é evitada pelo método baseado na emissão dos raios gama associados.

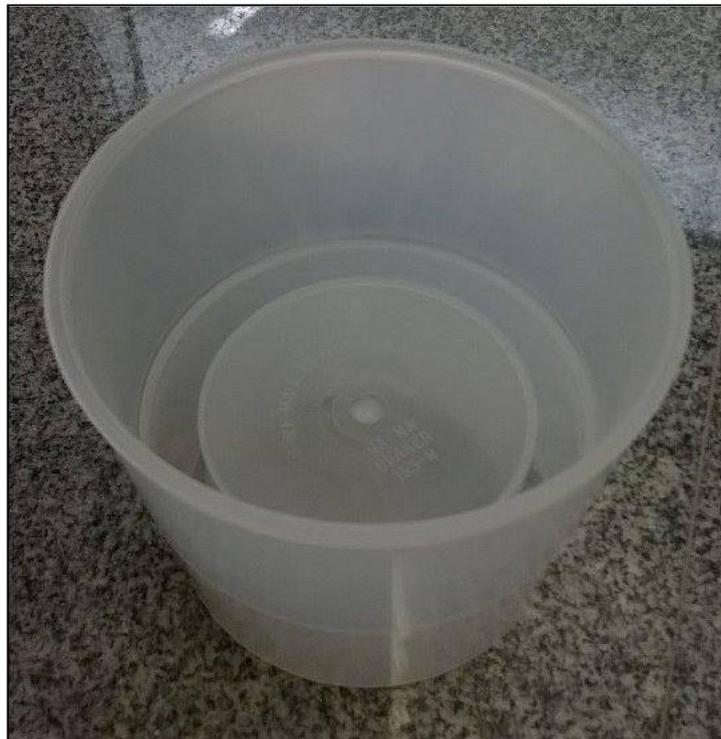
3.3.2- Leitura das amostras

A técnica de análise adotada, como já mencionada, baseia-se naquela desenvolvida por Bonotto *et al.* (2009). Entretanto, pretendeu aplicar espectrometria gama de alta resolução com detector HPGe e abolir o uso do espectrômetro alfa do tipo barreira de superfície,

utilizando o próprio sistema gama proposto para calibração e obtenção da atividade alfa total, com a expectativa de economia de tempo de trabalho e menores perdas, uma vez que para a análise no espectrômetro alfa em questão seria necessário aquecimento e evaporação por completo das amostras e seus resíduos depositado em discos de alumínio para a leitura alfa.

Em laboratório, as amostras foram submetidas à análise pelo espectrômetro gama com o referido detector acoplado, gerando assim seus respectivos espectros. O processo de leitura é relativamente simples, no qual se utilizam béqueres do tipo *Marinelli*, próprios para a análise, e com capacidade para um volume de um litro de amostra de água (Figura 16). A partir disto efetuou-se a detecção da emissão gama no espectrômetro através do *software* GammaVision da Ortec, versão 6.09 associado ao espectrômetro gama, que por sua vez encontra-se instalado nas dependências da UNESPetro, no campus da Unesp-Rio Claro. O tempo de leitura de cada uma das amostras foi em média 8 horas e meia.

Figura 16: Recipiente do tipo *Marinelli* de um litro de capacidade utilizado na leitura das amostras de águas subterrâneas.



Ao longo do projeto foram ainda definidas curvas de calibração em energia, concentração (ppm) e concentração de atividade ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$), estas duas últimas com base em fontes padrões de urânio, tório e potássio para o sistema espectrométrico gama através de fotopicos específicos de radionuclídeos filhos, além da emissão gama relacionada ao decaimento do ^{40}K por captura eletrônica. Para tal tarefa foi selecionado pelo menos um radionuclídeo representante das séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th , sendo que a contribuição do ^{235}U nas águas foi desconsiderada nesse trabalho em razão de sua pequena proporção isotópica na natural (0,7204%). As Tabelas 5 e 6 apresentam de forma ordenada todos os potenciais radionuclídeos e suas respectivas energias gama relacionadas ao decaimento beta e alfa com intensidades superiores a 1%.

Tabela 5: Emissões gama relacionadas ao decaimento beta das séries do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , cuja intensidade absoluta é maior que 1%.

Série de decaimento do ^{232}Th			Série de decaimento do ^{238}U			Série de decaimento do ^{235}U		
Nuclídeo	Energia (MEV)	Intensidade Absoluta (%)	Nuclídeo	Energia (MEV)	Intensidade Absoluta (%)	Nuclídeo	Energia (MEV)	Intensidade Absoluta (%)
^{228}Ra	0,014	1,6	^{234}Th	0,063	4,8	^{231}Th	0,026	14,5
^{228}Ac	0,099	1,3	^{234}Th	0,092	2,8	^{231}Th	0,084	6,6
^{228}Ac	0,129	2,4	^{234}Th	0,093	2,8	^{211}Pb	0,405	3,8
^{228}Ac	0,209	3,9	^{214}Pb	0,053	1,2	^{211}Pb	0,427	1,8
^{228}Ac	0,27	3,5	^{214}Pb	0,242	7,4	^{211}Pb	0,832	3,5
^{228}Ac	0,328	3	^{214}Pb	0,295	19,3			
^{228}Ac	0,338	1,3	^{214}Pb	0,352	37,6			
^{228}Ac	0,409	1,9	^{214}Pb	0,786	1,1			
^{228}Ac	0,463	4,4	^{214}Bi	0,609	46,1			
^{228}Ac	0,772	1,5	^{214}Bi	0,665	1,5			
^{228}Ac	0,794	4,2	^{214}Bi	0,768	4,9			
^{228}Ac	0,836	1,6	^{214}Bi	0,806	1,2			
^{228}Ac	0,911	25,8	^{214}Bi	0,934	3			
^{228}Ac	0,965	5	^{214}Bi	1,12	15,1			
^{228}Ac	0,969	15,8	^{214}Bi	1,155	1,6			
^{228}Ac	1,588	3,2	^{214}Bi	1,238	5,8			
^{228}Ac	1,631	1,5	^{214}Bi	1,281	1,4			
^{212}Pb	0,239	43,3	^{214}Bi	1,378	4			
^{212}Pb	0,3	3,3	^{214}Bi	1,402	1,3			
^{212}Bi	0,04	1,1	^{214}Bi	1,408	2,2			
^{212}Bi	0,727	6,6	^{214}Bi	1,509	2,1			
^{212}Bi	0,785	1,1	^{214}Bi	1,661	1,2			
^{212}Bi	1,62	1,5	^{214}Bi	1,73	2,9			
^{208}Tl	0,277	6,3	^{214}Bi	1,764	15,4			
^{208}Tl	0,511	22,6	^{214}Bi	1,847	2,1			
^{208}Tl	0,583	84,5	^{214}Bi	2,118	1,1			
^{208}Tl	0,763	1,8	^{214}Bi	2,204	5,1			
^{208}Tl	0,86	12,4	^{214}Bi	2,448	1,6			
^{208}Tl	2,614	99	^{210}Pb	0,046	4,2			

Fonte: Chu et al (1999)

Tabela 6: Emissões gama relacionadas ao decaimento alfa das séries do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , cuja intensidade absoluta é maior que 1%.

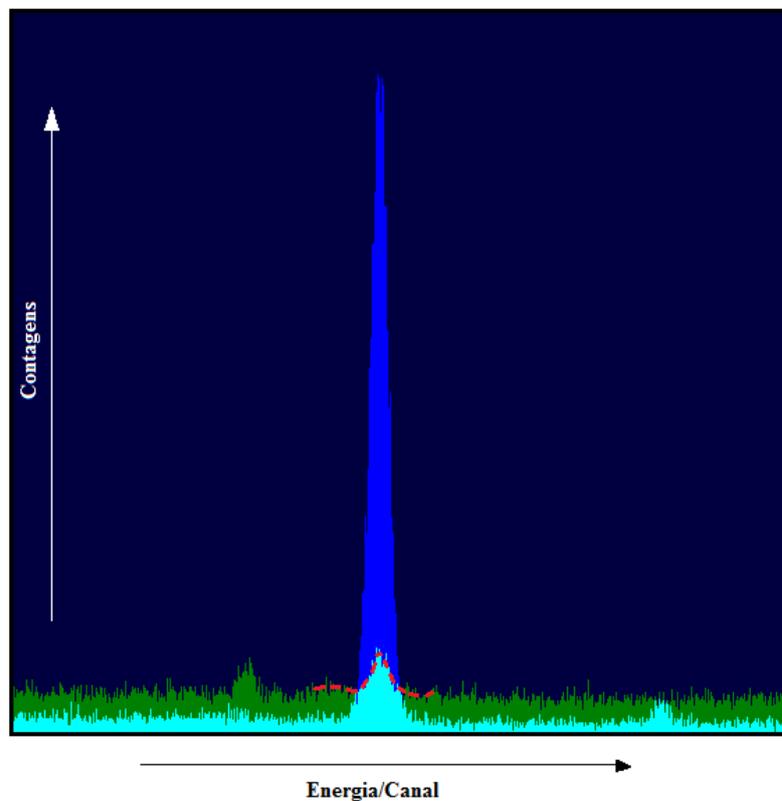
Série de decaimento do ^{232}Th			Série de decaimento do ^{238}U			Série de decaimento do ^{235}U		
Nuclídeo	Energia (MEV)	Intensidade Absoluta (%)	Nuclídeo	Energia (MEV)	Intensidade Absoluta (%)	Nuclídeo	Energia (MEV)	Intensidade Absoluta (%)
^{228}Th	0,084	1,2	^{226}Ra	0,186	3,6	^{235}U	0,109	1,5
^{224}Ra	0,241	4,1				^{235}U	0,163	5,1
^{212}Bi	0,04	2				^{235}U	0,186	57,2
						^{235}U	0,202	1,1
						^{235}U	0,205	5
						^{231}Pa	0,027	10,3
						^{231}Pa	0,284	1,7
						^{231}Pa	0,3	2,5
						^{231}Pa	0,303	2,2
						^{231}Pa	0,33	1,4
						^{227}Th	0,05	8
						^{227}Th	0,08	1,9
						^{227}Th	0,094	1,4
						^{227}Th	0,211	1,1
						^{227}Th	0,236	12,3
						^{227}Th	0,256	7
						^{227}Th	0,286	1,5
						^{227}Th	0,3	2,3
						^{227}Th	0,304	1,2
						^{227}Th	0,33	2,7
						^{223}Ra	0,122	1,2
						^{223}Ra	0,144	3,2
						^{223}Ra	0,154	5,6
						^{223}Ra	0,269	13,7
						^{223}Ra	0,324	3,9
						^{223}Ra	0,338	2,8
						^{223}Ra	0,445	1,3
						^{119}Rn	0,271	10,8
						^{119}Rn	0,402	6,4
						^{211}Bi	0,351	12,9

Fonte: Chu et al (1999)

3.3.3 Radiação de Fundo

A radiação de fundo detectada (*background*, BG) durante a análise pelo sistema tem sua origem principal no próprio componente de blindagem do equipamento, além da radiatividade do ar, solo, subsolo e materiais constituintes do laboratório onde os trabalhos foram realizados. Juntamente com o chumbo da blindagem, encontram-se radionuclídeos da série de decaimento do urânio e tório que acabam por afetar a taxa de decaimento detectada nas amostras, sendo necessária a subtração desta atividade dos picos analisados. Em geral, a radiação de fundo foi medida por um tempo de aproximadamente 9 horas e sua quantificação é de suma importância para a os processos de análise envolvendo o sistema espectrométrico. A Figura 17 exemplifica com a comparação entre a radiação de fundo com um fotopico gama gerado por fonte padrão de urânio.

Figura 17: Fotopico gama referente ao ^{214}Bi de energia 609,31 keV (azul) comparado com o pico gerado pela radiação de fundo (BG) delimitado pela linha pontilhada vermelha.



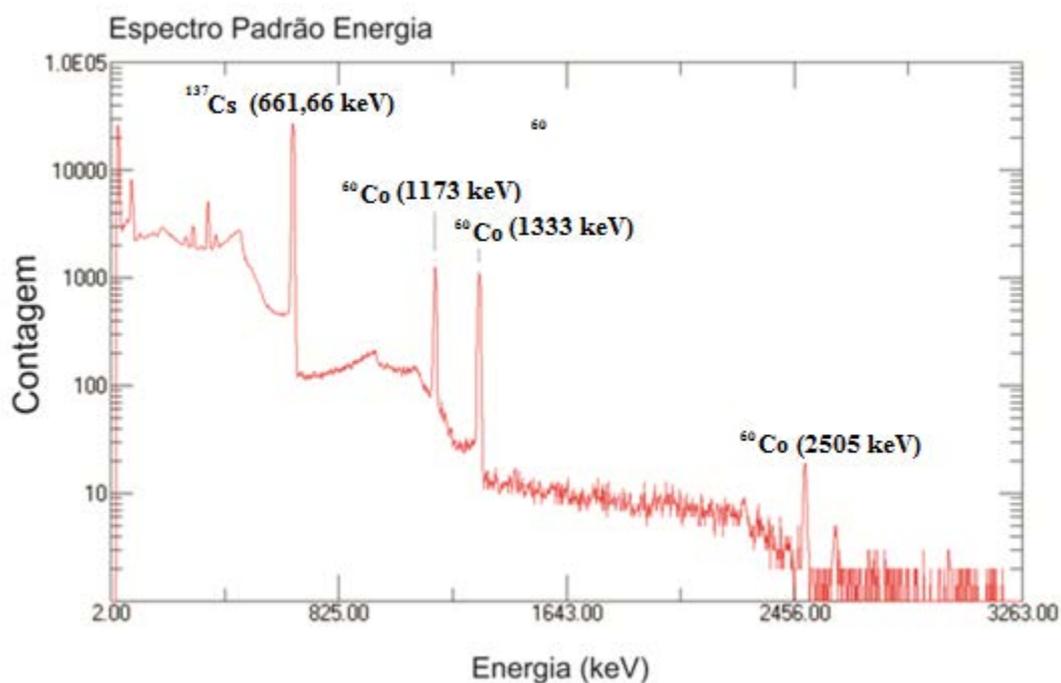
3.3.4- Calibração do sistema em energia

A calibração em energia do espectrômetro gama é fundamental para a execução do trabalho proposto, pois correlaciona a energia gama de um determinado radionuclídeo (pico) com seu respectivo canal. Os picos gama utilizados na calibração foram possíveis através de fontes artificiais radioativas contendo ^{137}Cs e ^{60}Co com suas respectivas energias conhecidas, conforme os dados da Tabela 7. A Figura 18, por sua vez, indica localização dos picos gama dentro do espectro gama gerado pela leitura da fonte radioativa padrão.

Tabela 7: Tabela de calibração de energia com os dados radionuclídeos, e suas respectivas energias, utilizados na calibração.

Nuclídeo	Canal	Energia keV
^{137}Cs	3279	661,657
^{60}Co	5835	1.173,237
^{60}Co	6628	1.332,501
^{60}Co	12485	2505

Figura 18: Espectro do padrão para calibração em energia com indicação dos picos de interesse.



Com base nos valores acima, foi gerada a curva de calibração em energia do sistema através da interpolação destes valores. A curva possui em seu eixo das abscissas os números de canais do sistema e o eixo das coordenadas, por sua vez, representado por valores de energia gama.

O pico referente à energia 2505 keV corresponde ao “pico soma” relativo à soma das energias das outras duas transições nucleares (1173,237 e 1332,501 keV). A ocorrência deste pico soma dá-se quando a meia-vida de um nível intermediário de energia é curta quando comparada ao tempo de resposta do detector em questão, ou seja, quando existem transições nucleares coincidentes (DUARTE, 2002).

3.3.5- Calibração do sistema em concentração

O espectrômetro gama foi eficientemente calibrado em concentração com base em radionuclídeos da série do ^{238}U e ^{232}Th e também ^{40}K listados na Tabela 8. Os padrões de urânio, adquiridos junto ao “New Brunswick Laboratory” do “U.S. Department of Energy Argonne”, Illinois, Estados Unidos, consistem em pechblenda e seu espectro, juntamente com os picos de interesse para calibração em beta e alfa, são exibidos junto à Figura 19.

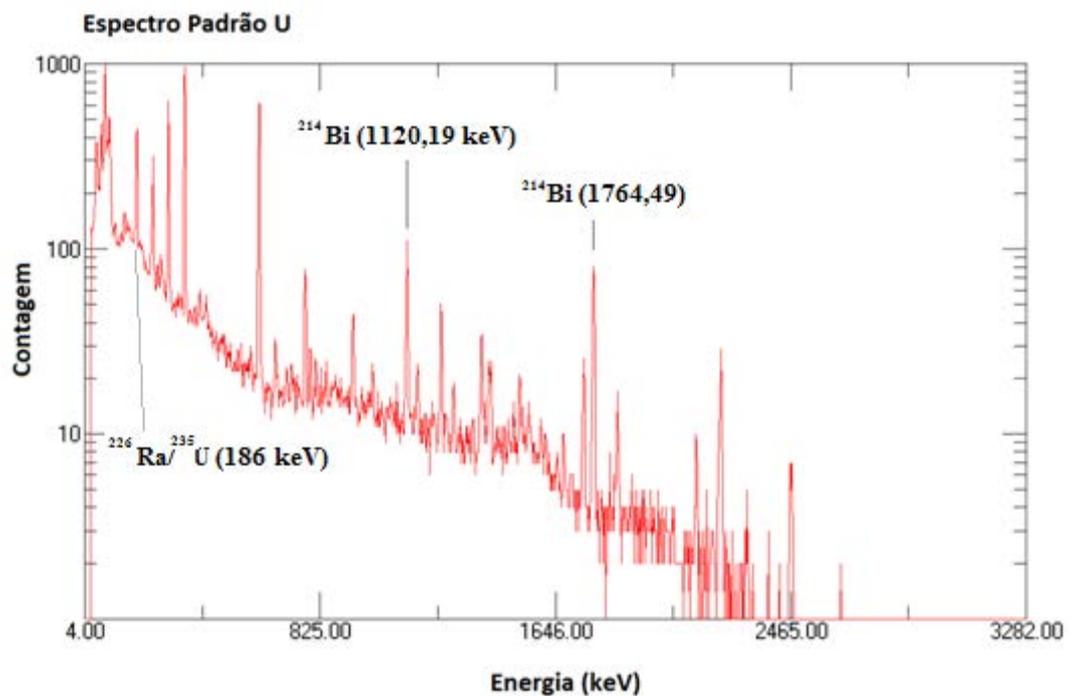
Foram escolhidos os picos referentes ao radionuclídeo ^{214}Bi de energias 1.120,19 e 1.764,49 KeV como representantes do decaimento beta da série do ^{238}U .

Os procedimentos para a geração da curva de calibração em concentração se baseiam na obtenção do número de contagens referentes ao pico de interesse e posterior divisão do valor obtido pelo tempo de análise, gerando a taxa de decaimento, em contagens por segundo (cps). Em todos os casos houve a preocupação de se subtrair a taxa de decaimento referente à radioatividade ambiente a fim de se assegurar que apenas as atividades provenientes dos radionuclídeos presentes nas amostras fossem analisadas. Em seguida foram calculados os valores de intensidade efetiva ($\text{cps}\cdot\text{g}^{-1}$) através da divisão da taxa de decaimento pela massa de cada um dos padrões (g).

Tabela 8: Picos gama e seus respectivos radionuclídeos utilizados na calibração em concentração e concentração em atividade do sistema espectrométrico.

	Radionuclídeo	Energia Gama (keV)	Intensidade (%)	Decaimento
Série do ^{238}U	^{214}Bi	1.120	15,1	Beta
	^{214}Bi	1.764	15,4	Beta
	^{226}Ra	186,1	3,505	Alfa
Série do ^{232}Th	^{208}Tl	583,19	84,5	Beta
	^{208}Tl	2.614,53	99	Beta
	^{228}Ac	911,21	25,8	Beta
	^{228}Ac	968,97	15,8	Beta
	^{224}Ra	240,986	4,1	Alfa
Potássio	^{40}K	1.461	11	Beta

Figura 19: Espectro do padrão de urânio com indicação dos picos de interesse.



A curva de calibração em concentração, gerada pelo *software* Excel 2007, é dada pela intensidade efetiva no eixo das abscissas e concentração de urânio, tório ou potássio (ppm) dos padrões ao longo do eixo das coordenadas, juntamente com funções e respectivos valores de R^2 .

A calibração em alfa se deu pela determinação da taxa de contagem de um fotopico produto da sobreposição do ^{226}Ra (186,1010 keV) juntamente com ^{235}U (185,7121 keV), ambos correspondendo à emissão alfa e pertencentes à série de decaimento do ^{238}U e ^{235}U , respectivamente. Essa escolha se dá pela ausência de picos isolados representantes de decaimento alfa, mesmo com a alta resolução do detector HPGe utilizado.

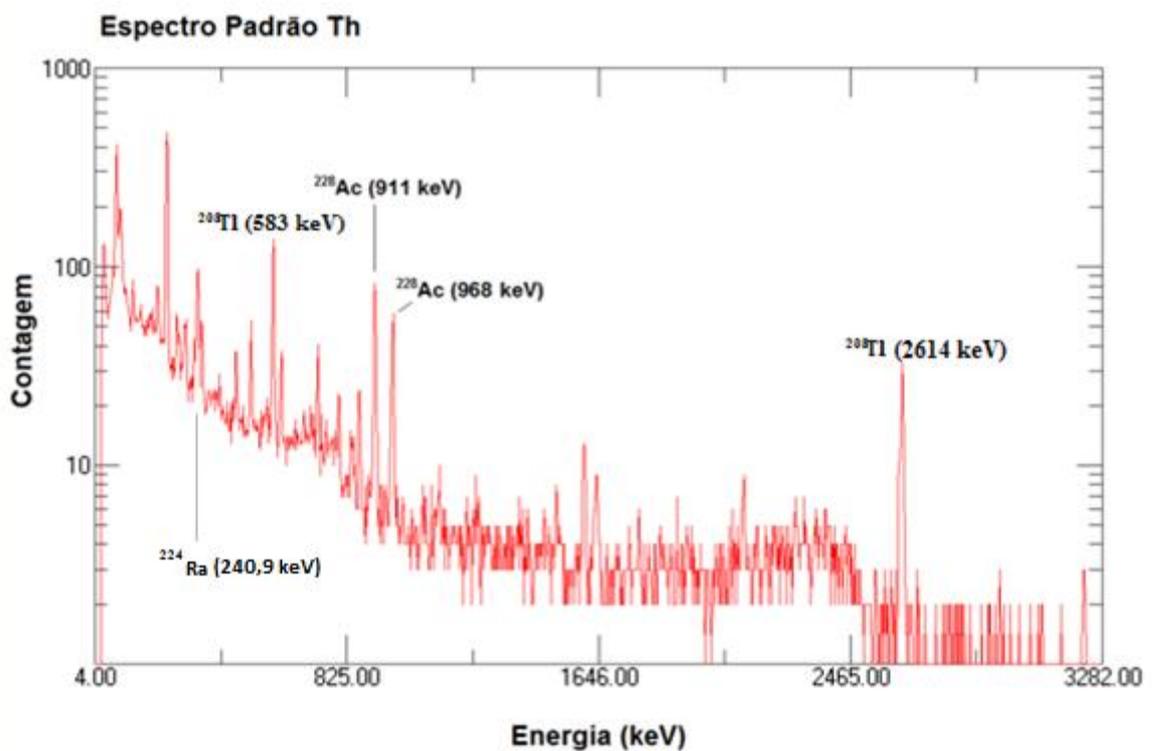
Os padrões de tório, por sua vez, consistem em areias monazíticas adquiridas também pelo “New Brunswick laboratory” do U.S. Department of Energy”, Estados Unidos e padrões elaborados no LABIDRO a partir de amostras de sedimento de corrente proveniente do Morro do Ferro (Poços de Caldas, MG). Foram escolhidos dois picos referentes ao decaimento beta do ^{208}Tl (583,19 e 2614,53 KeV) comumente utilizados no meio científico em razão de suas altas intensidades, cujas localizações no espectro gama do padrão de Th são indicadas na Figura 20.

Para efeitos comparativos, o sistema gama espectrométrico foi calibrado também com base no ^{228}Ac , outro radionuclídeo de decaimento beta da série do ^{232}Th . Essa escolha possibilita a comparação com os resultados da atividade beta total calculados através do ^{208}Tl , além da confirmação ou não do equilíbrio secular dos padrões, já que o actínio é anterior à formação do ^{222}Rn dentro de sua série de decaimento. Os picos gama utilizados foram os de maior intensidade, com energias de 911,21 e 968,97 keV.

A escolha do radionuclídeo de decaimento alfa representante da série do tório se mostrou uma das maiores desafios do projeto, haja vista o baixo número de decaimentos com potencial para calibração em razão dos baixos valores de energias gama, baixas intensidades dos picos e também pela sobreposição com outros radionuclídeos (ver Tabela 6). O único representante encontrado com potencial para calibração do sistema foi o ^{224}Ra de energia 240,986 keV, embora o mesmo esteja sobreposto ou muito próximo aos picos mais intensos referentes ao ^{212}Pb (238,632 keV, da série do ^{232}Th), ^{227}Th (235,971 keV, da série do ^{235}U) e

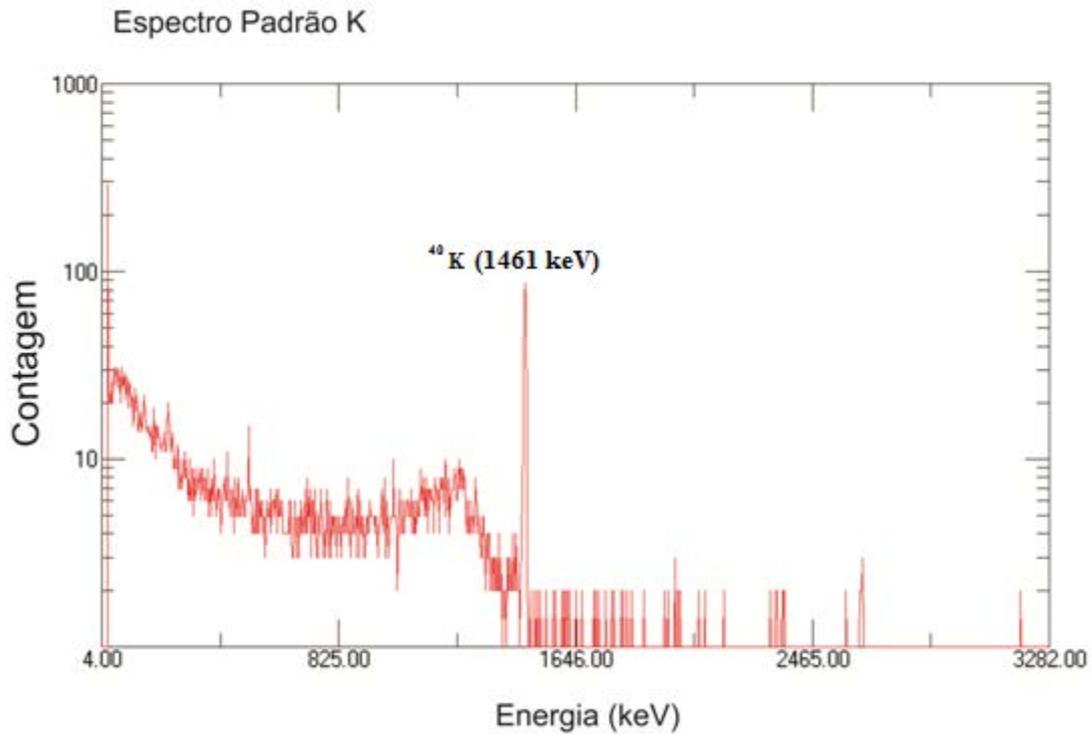
^{214}Pb (241,997 keV, da série do ^{238}U), tornando muito difícil sua identificação no espectro. Uma alternativa escolhida foi a delimitação da área de abrangência de todos os picos dos radionuclídeos mencionados para o cálculo da taxa de decaimento dos mesmos em conjunto. Posteriormente foi efetuada a separação da atividade referente ao ^{224}Ra com base em cálculos matemáticos através das concentrações de U e Th nas amostras, conforme procedimentos que ainda serão tratados nesse trabalho.

Figura 20: Espectro do padrão de tório com indicação dos picos de interesse.



Por fim, uma curva de calibração foi gerada com base em padrões de potássio. Esses padrões foram produzidos a partir da mistura e homogeneização de KCl (P.A.) com sílica, ambos apresentando alta pureza. Os padrões de diferentes concentrações de potássio, mostrados na Tabela 10, são: 100% de KCl (Código LII-KCl-1), 25% de KCl (LII-KCl-2), 5% de KCl (LII-KCl-3), 2,5% de KCl (LII-KCl-4) e 0,5% de KCl (LII-KCl-5), e o espectro gama associado ao padrão de K é exibido na Figura 21. O cálculo da intensidade efetiva foi realizado com base no pico associado ao ^{40}K de energia 1.460.830 keV.

Figura 21: Espectro do padrão de potássio com indicação do pico de interesse.



3.3.6- Calibração do sistema em concentração de atividade

Para a realização da calibração do sistema espectrométrico em concentração de atividade, foi necessário o cálculo da atividade radioativa de cada padrão utilizado, levando-se em conta valores de atividade específica de cada elemento (Tabela 9), conforme sua concentração em cada um dos padrões. O valor obtido foi então relacionado à massa dos padrões utilizados na calibração ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$).

Tabela 9: Valores de atividade específica utilizados para cada um dos radionuclídeos dos padrões. O valor referente ao ^{40}K é considerada “natural”, ou seja, leva em conta as frações isotópicas naturais dos diferentes isótopos do elemento.

Radioisótopo	Atividade Específica (Bq/g)
^{40}K	31,3
^{232}Th	4057
^{238}U	12437

Fonte: Pearce (2008)

Com base nesse aspecto, foram geradas as curvas de calibração em concentração de atividade, cujos gráficos exibem, no eixo das ordenadas, os valores de atividade obtidos conforme os parâmetros acima (Bq.g^{-1}) e o eixo das abscissas cotendo a variável expressa em cps.g^{-1} (intensidade efetiva) para cada um dos picos de interesse, de uma maneira bastante semelhante ao exposto no capítulo anterior e com a utilização dos mesmos radionuclídeos e seus respectivos fotopicos, de acordo com os dados das tabelas 10, 11 e 12 referentes aos padrões utilizados.

Tabela 10: Dados de atividade (Bq) e atividade por massa (Bq.g^{-1}) da fonte radioativa padrão de urânio.

Código Padrão Urânio	Massa (g)	U (ppm)	U (%)	U (g)	Atividade (Bq)	Atividade por massa (Bq.g^{-1})
NBL-101-A	50,00	10000	1	0,5	6218,5	124,37
NBL-102-A	50,00	1000	0,1	0,05	621,85	12,437
NBL-103-A	50,00	500	0,05	0,025	310,92	6,2185
NBL-104-A	48,96	100	0,01	0,004896	60,89	1,2437
NBL-105-A	50,00	10	0,001	0,0005	6,21	0,12437
NBL-106-A	50,00	400	0,04	0,02	248,74	4,9748
NBL-107-A	50,00	40	0,004	0,002	24,874	0,49748

Tabela 11: Dados de atividade (Bq) e atividade por massa (Bq.g^{-1}) da fonte radioativa padrão de tório.

Código Padrão Tório	Massa (g)	Th (ppm)	Th (%)	Th (g)	Atividade (Bq)	Atividade por massa (Bq.g^{-1})
NBL-106-A	50,00	10000	1	0,5	2028,50	40,57
NBL-107-A	50,00	1000	0,1	0,05	202,85	4,057
NBL-108-A	50,00	500	0,05	0,025	101,42	2,0285
NBL-109-A	48,96	100	0,01	0,004896	19,86	0,4057
NBL-110-A	50,00	10	0,001	0,0005	2,02	0,04057
LII-Th-1	50,00	5	0,0005	0,00025	1,01	0,020285
LII-Th-2	50,00	2,5	0,00025	0,000125	0,50	0,0101425
LII-Th-3	50,00	1,25	0,000125	6,25E-05	0,25	0,00507125

Tabela 12: Dados de atividade (Bq) e atividade por massa (Bq.g⁻¹) da fonte radioativa padrão de potássio.

Código Padrão Potássio	Massa (g)	KCl (%)	KCl (g)	K (g)	Atividade (Bq)	Atividade por massa (Bq.g ⁻¹)
LII-KCl-1	50	100,00	50,00	26,21705	820,5935977	16,41187195
LII-KCl-2	50	25,00	12,50	6,554262	205,1483994	4,102967989
LII-KCl-3	50	5,00	2,50	1,310852	41,02967989	0,820593598
LII-KCl-4	50	2,50	1,25	0,655426	20,51483994	0,410296799
LII-KCl-5	50	0,50	0,25	0,131085	4,102967989	0,08205936

3.3.7- Eficiência de detecção

A eficiência de detecção (ϵf) nada mais é do que a razão entre o número de eventos detectados e o real número de decaimentos efetuados pela fonte radioativa, também entendida em termos de contagens medidas (cps) pela taxa de desintegração teórica (dps) conforme a fórmula 1.0:

$$\epsilon f(\%) = \frac{\text{cps}}{\text{dps}} \quad (1.0)$$

Ou seja,

$$\epsilon f(\%) = \frac{\text{cps} - \text{BG}}{f\% \cdot A} \quad (1.1)$$

Onde:

$\epsilon f(\%)$ = eficiência de detecção

cps = número de eventos detectados por segundo

BG = atividade de fundo (cps)

f% = porcentagem de raios gama emitidos pelo radionuclídeo (intensidade do pico)

A = Atividade conhecida do padrão (Bq)

A eficiência de detecção do sistema espectrométrico depende diretamente da energia da radiação gama incidente no detector e seus valores tendem a ser inversamente proporcionais ao aumento de energia da emissão gama. Outros fatores como absorção, auto-absorção, dispersão da radiação e disposição geométrica da amostra também interferem neste parâmetro, principalmente esse último, conforme trabalhos de Rodrigues et al. (2011) onde foram comparadas as eficiências de detecção entre fontes pontuais e recipientes do tipo Marinelli.

Neste trabalho foram utilizadas as mesmas fontes padrões radioativas de urânio, tório e potássio mencionadas nas outras etapas de calibração. Buscou-se o maior número possível de radionuclídeos para que se pudesse gerar uma curva de eficiência com ampla abrangência do espectro gama gerado pelo detector. Os picos escolhidos com suas respectivas energias gama são listados na Tabela 13.

Tabela 13: Lista de radionuclídeos utilizados na geração da curva de eficiência de detecção.

Radionuclídeo	Energia (keV)	Intensidade do pico (%)	Eficiência de detecção calculada (%)
^{210}Pb	46,54	4,25	14,28
^{214}Pb	242	7,43	6,06
^{214}Pb	295,2	19,3	4,35
^{214}Pb	352	37,6	3,54
^{208}Tl	583,19	84,5	1,24
^{214}Bi	609	46,1	1,89
^{228}Ac	911,21	25,8	2,37
^{228}Ac	968,97	15,8	2,96
^{214}Bi	1120,29	15,1	2,67
^{40}K	1460,83	11	1,83
^{214}Bi	1764,49	15,4	1,42
^{214}Bi	2204,21	5,08	0,81
^{208}Tl	2614,53	99	0,28

3.3.8- Cálculo da atividade

Uma vez calculada a eficiência de detecção (ϵf), o cálculo da atividade (A) das amostras referente a cada uma das séries de decaimento foi possível pela Fórmula 2.0, descrita abaixo:

$$A = \frac{\text{cps} - \text{BG}}{f\% \cdot \epsilon f(\%)} \quad (2.0)$$

Sendo “ V ” o volume da amostra expressa em litros, pode-se obter o valor final em termos de atividade por volume (Bq.L^{-1}), também denominada atividade específica (A_s):

$$A_s = \frac{A}{V} \quad (2.1)$$

A atividade beta total foi finalmente obtida pela somatória das médias das atividades específicas parciais de cada uma das séries de decaimento, isto é, urânio, tório e também da desintegração referente ao ^{40}K (Anexo 4).

Os procedimentos para a geração dos resultados da atividade alfa total foram relativamente mais complexos do que aqueles apresentados para a atividade beta, já que se tratam de picos sobrepostos ou com interferência de outros radionuclídeos. Os cálculos necessários para a separação dos picos justapostos do ^{226}Ra e ^{235}U são desenvolvidos no Anexo 2 e compreendem o emprego da equação 2.0 para a obtenção da razão entre as taxas de decaimento (cps) do ^{235}U e ^{238}U . Essa razão foi então utilizada para o cálculo da contribuição da taxa de decaimento referente ao ^{226}Ra nos picos totais obtidos pela leitura das amostras e, conseqüentemente, a obtenção dos valores de atividade alfa.

O maior desafio foi, sem dúvida, isolar a contribuição do ^{224}Ra na região do espectro padrão de tório tomada por outros três picos bastante próximos uns aos outros.

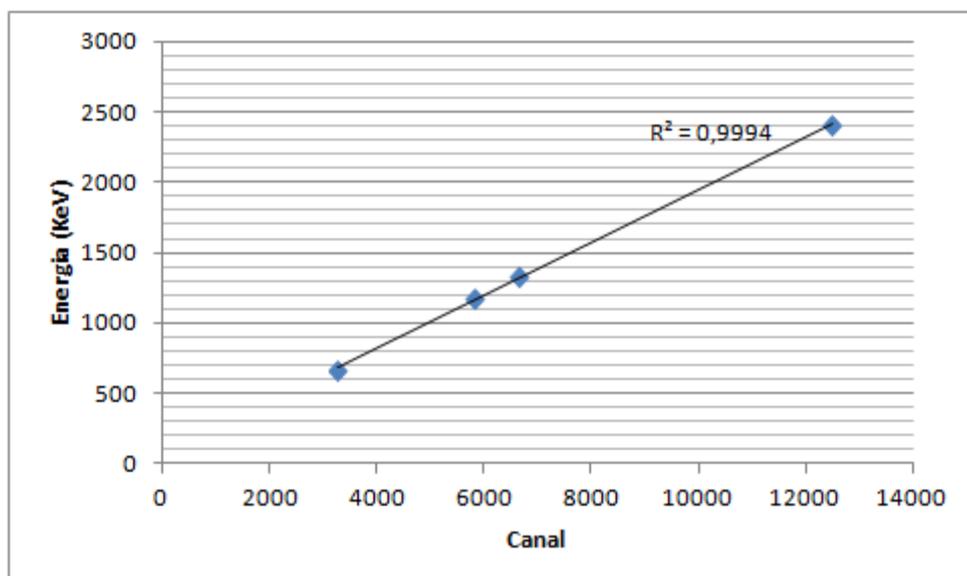
Diferentemente do pico sobreposto do ^{226}Ra e ^{235}U , o cálculo envolveu radionuclídeos filhos de três séries de decaimento distintas: ^{238}U (^{214}Pb), ^{235}U (^{227}Th) e ^{232}Th (^{212}Pb e ^{224}Ra , este último o radionuclídeo de interesse). Os cálculos envolveram a utilização das curvas de calibração em concentração e as intensidades efetivas do ^{208}Tl e $^{226}\text{Ra}/^{235}\text{U}$ para a obtenção dos valores de concentração de urânio e tório nas amostras, cujas atividades foram utilizadas na equação 2.0 para a geração da taxa de decaimento de cada um dos quatro radionuclídeos. Com isso pôde-se calcular a contribuição da taxa de decaimento do ^{224}Ra e, conseqüentemente, empregá-la nas amostras para o cálculo da atividade alfa associada, conforme o Anexo 3.

4.0- Resultados e Discussões

4.1- Calibrações

De maneira geral, todas as curvas de calibração em energia e concentração geradas se mostraram bastantes satisfatórias com significativos coeficientes de correlação, geralmente superiores a 0,95. A curva de calibração em energia obtida é dada pela função: $E=0,1883*Ch+64,434$, onde “E” é a energia (em keV) e “Ch” representa o número do canal no analisador multicanal. O ajuste da curva se mostrou bastante razoável, uma vez que foi obtido o valor de R^2 de 0,9994 (Figura 22).

Figura 22: Curva de calibração de energia com os radionuclídeos e suas respectivas energias.



As calibrações em concentração referentes ao ^{214}Bi de energias 1120,19 e 1764,49 keV de desintegração beta são, por sua vez, descritas pelas funções $\log(C_U) = 1,0465 \cdot \log(I_e) + 4,549$ e $\log(C_U) = 1,034 \cdot \log(I_e) + 4,6548$, respectivamente (Figuras 23 e 24), onde “ C_U ” é a concentração de urânio da fonte radioativa padrão em ppm e “ I_e ” a intensidade efetiva ($\text{cps} \cdot \text{g}^{-1}$) calculadas de acordo com os dados das Tabelas 14 e 15.

Figura 23: Curva de calibração em concentração referente ao pico do ^{214}Bi de energia 1120,19 keV.

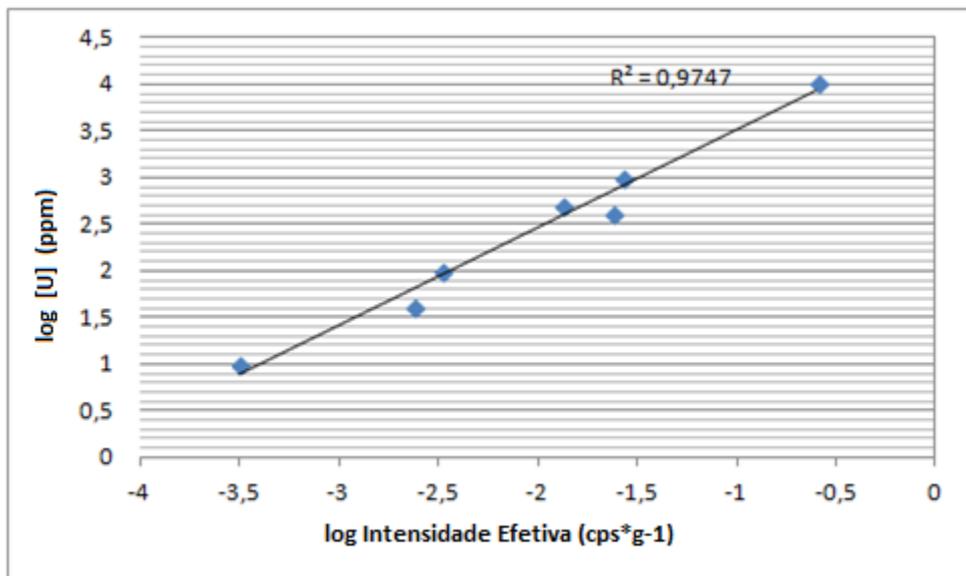


Figura 24: Curvas de calibração em concentração referente ao pico do ^{214}Bi de energia 1.764,49

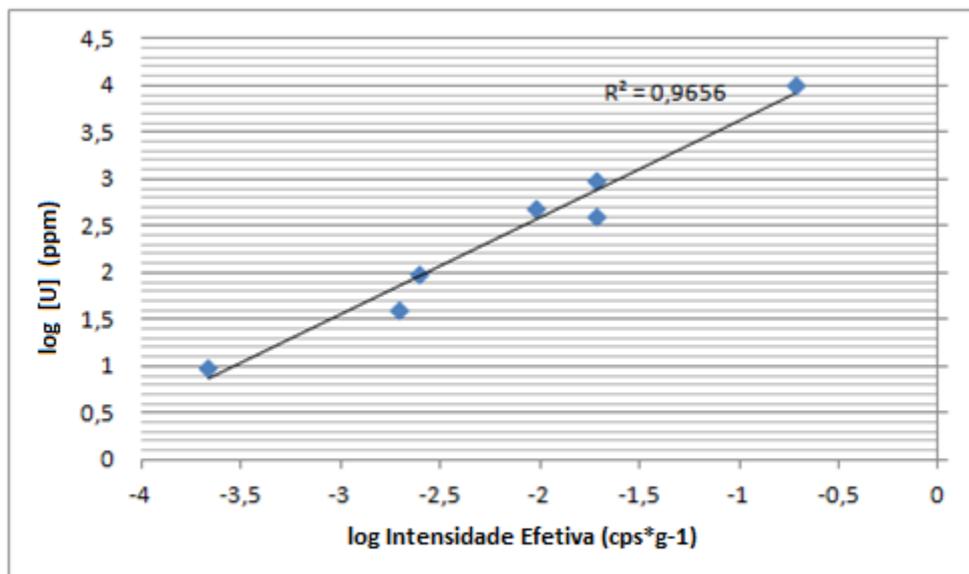


Tabela 14: Dados de calibração em concentração referentes aos pico do ^{214}Bi de energia 1.120,19 keV.

Código do Padrao	Massa (g)	Concentração (ppm U)	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g ⁻¹)
NBL-101-A	50	10000	261,66	3311	0,015191776	12,65382558	0,252772676
NBL-102-A	50	1000	1211,44	1622	0,014203998	1,338902463	0,026493969
NBL-103-A	50	500	7744,32	5296	0,017955054	0,683856039	0,01331802
NBL-104-A	48,96	100	11027,9	1922	0,013328752	0,174285222	0,00328751
NBL-105-A	50	10	79403,76	2444	0,014916699	0,030779399	0,000317254
NBL-106-A	50	400	13887,36	16849	0,011753309	1,213261556	0,024030165
NBL-107-A	50	40	71757,24	9325	0,011578259	0,129952044	0,002367476

Tabela 15: Dados de calibração em concentração referentes aos pico do ^{214}Bi de energia 1.764,49 keV.

Código do Padrao	Massa (g)	Concentração (ppm U)	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g ⁻¹)
NBL-101-A	50	10000	261,66	2490	0,009691146	9,506474871	0,190129497
NBL-102-A	50	1000	1211,44	1180	0,008353092	0,965694322	0,019313886
NBL-103-A	50	500	7744,32	3723	0,009002633	0,471736799	0,009434736
NBL-104-A	48,96	100	11027,9	1410	0,008249166	0,119608359	0,002442981
NBL-105-A	50	10	79403,76	1442	0,007313827	0,010846522	0,00021693
NBL-106-A	50	400	13887,36	13276	0,008262157	0,947715077	0,018954302
NBL-107-A	50	40	71757,24	7715	0,00911955	0,098395733	0,001967915

A série de decaimento do ^{238}U é ainda representada pela calibração em concentração referente ao decaimento alfa do ^{226}Ra de energia 186,10 keV e sobreposto ao pico do ^{235}U , como já mencionado. Sua função é dada por: $\log(C_U) = 0,9462 \cdot \log(I_e) + 3,7714$ e o coeficiente de correlação obtido através da interpolação dos dados foi o menor entre todas as curvas de calibração, embora ainda permaneça dentro de limites aceitáveis (Figura 25 e Tabela 1

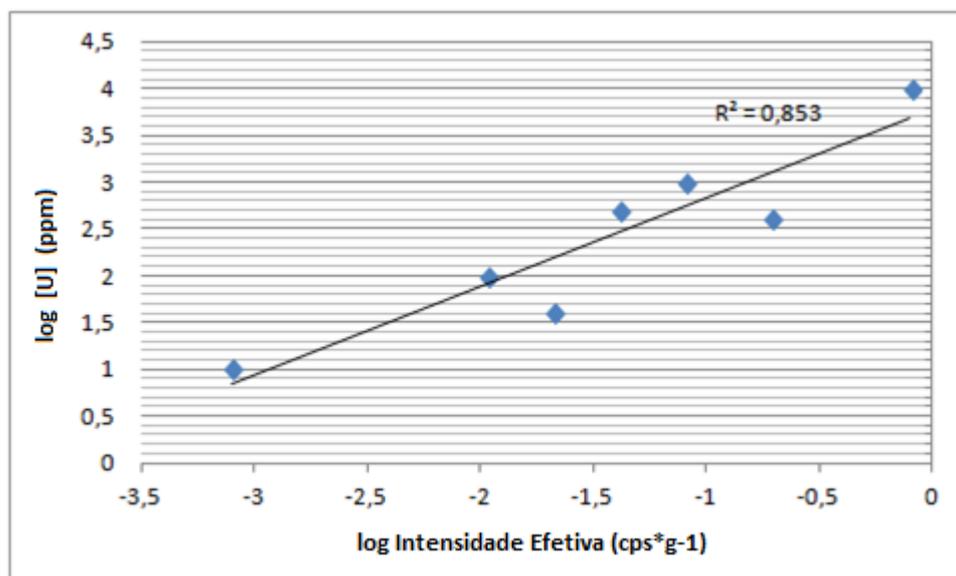
Figura 25: Curva de calibração em concentração referente ao fotopico do $^{226}\text{Ra}/^{235}\text{U}$.

Tabela 16: Dados de calibração em concentração referente ao fotopico do $^{226}\text{Ra}/^{235}\text{U}$.

Código do Padrao	Massa (g)	Concentração (ppm U)	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g ⁻¹)
NBL-101-A	50	10000	261,66	10430	0,087674993	39,77321318	0,795464264
NBL-102-A	50	1000	1211,44	4957	0,087830882	4,003993723	0,080079874
NBL-103-A	50	500	7744,32	16614	0,098262505	2,047051738	0,040941035
NBL-104-A	48,96	100	11027,9	6825	0,091221485	0,527663344	0,010777438
NBL-105-A	50	10	79403,76	9750	0,082855401	0,039934754	0,000798695
NBL-106-A	50	400	13887,36	136282	0,084258409	9,729125848	0,194582517
NBL-107-A	50	40	71757,24	82006	0,08954567	1,053279779	0,021065596

No que tange à série de decaimento do ^{232}Th , a desintegração beta associada ao ^{228}Ac gerou duas funções segundo a calibração em concentração: $\log(C_{\text{Th}}) = 1,0619 \cdot \log(\text{Ie}) + 4,7028$ referente ao pico gama de energia 911,21 keV e $\log(C_{\text{Th}}) = 1,0838 \cdot \log(\text{Ie}) + 4,8625$ com base no radionuclídeo de energia 968,97 keV (Figuras 26 e 27), onde “ C_{Th} ” representa a concentração de tório da fonte padrão. Os valores calculados de intensidade efetiva são apresentados nas Tabelas 17 e 18.

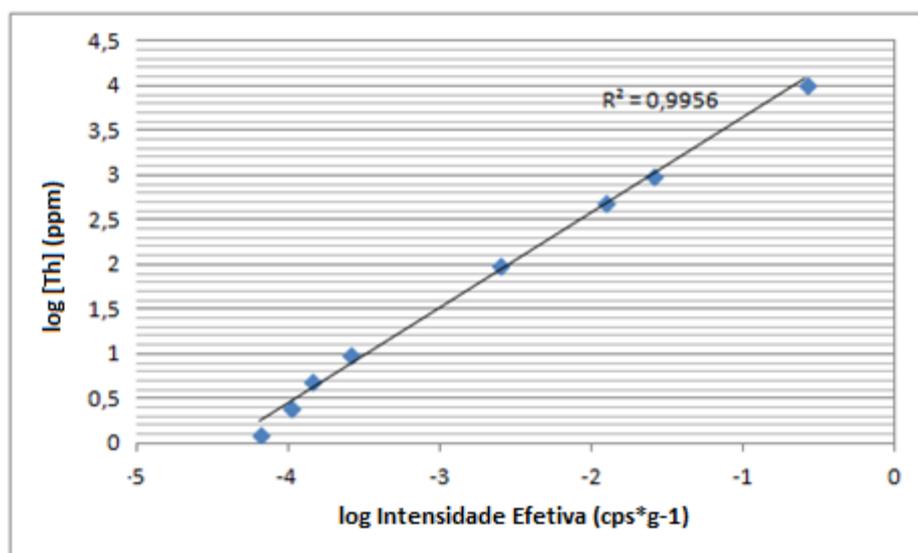
Figura 26: Curvas de calibração em concentração referente ao pico do ^{228}Ac de energia 911,21 keV.

Figura 27: Curvas de calibração em concentração referente ao pico do ^{228}Ac de energias 968,97 keV.

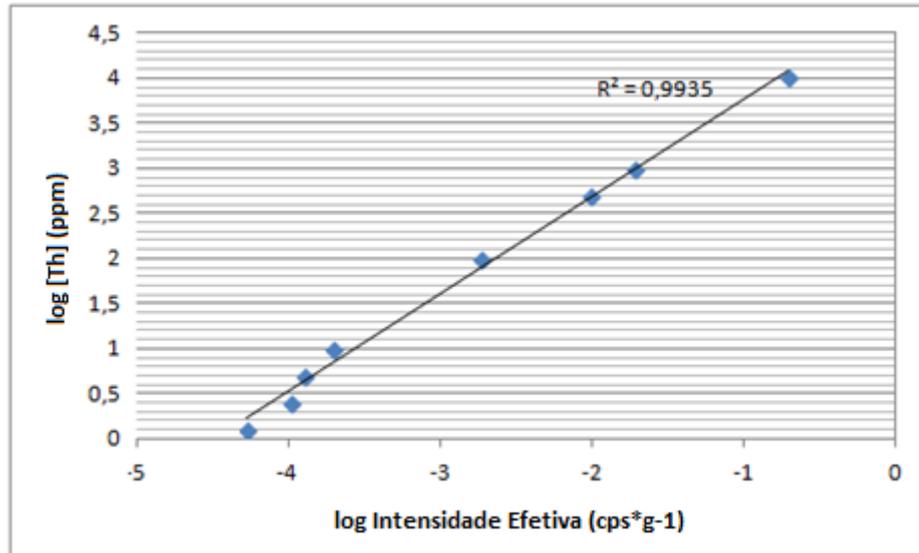


Tabela 17: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{228}Ac de energia 911,21 keV.

Código do Padrao	Massa (g)	Concentração (ppm U)	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g-1)
NBL-106-A	50	10000	197,78	2527	0,024144324	12,75267841	0,255053568
NBL-107-A	50	1000	757,18	970	0,024144324	1,256924906	0,025138498
NBL-108-A	50	500	1204,34	751	0,024144324	0,599433735	0,011988675
NBL-109-A	48,96	100	6049,86	874	0,024144324	0,120321828	0,002457554
NBL-110-A	50	10	20584,6	760	0,024144324	0,01277648	0,00025553
LII-Th-1	50	5	26757,82	835	0,024144324	0,007061506	0,00014123
LII-Th-2	50	2,5	58764,76	1716	0,024144324	0,00505685	0,000101137
LII-Th-2	50	1,25	56855,66	1558	0,024144324	0,0032584	6,5168E-05

Tabela 18: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{228}Ac de energia 968,97 keV.

Código do Padrao	Massa (g)	Concentração (ppm U)	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g-1)
NBL-106-A	50	10000	1920	2527	0,023672887	9,684083205	0,193681664
NBL-107-A	50	1000	724	970	0,023672887	0,932506621	0,018650132
NBL-108-A	50	500	602	751	0,023672887	0,476185957	0,009523719
NBL-109-A	48,96	100	690	874	0,023672887	0,090379339	0,001845983
NBL-110-A	50	10	684	760	0,023672887	0,009555837	0,000191117
LII-Th-1	50	5	803	835	0,023672887	0,006337031	0,000126741
LII-Th-2	50	2,5	1695	1716	0,023672887	0,00517093	0,000103419
LII-Th-2	50	1,25	1497	1558	0,023672887	0,002656945	5,31389E-05

Ainda na série do tório, os picos gama associados ao decaimento beta do ^{208}Tl de energias 583,19 e 2614,53 KeV geraram curvas definidas pelas equações: $\log(C_{\text{Th}}) = 1,0487 \cdot \log(I_e) + 4,4324$ e $\log(C_{\text{Th}}) = 0,8734 \cdot \log(I_e) + 4,6647$, também apresentando bons coeficientes de correlação (Figuras 28 e 29 e Tabelas 19 e 20).

Figura 28: Curva de calibração em concentração referente ao pico do ^{208}Tl (583,19 keV).

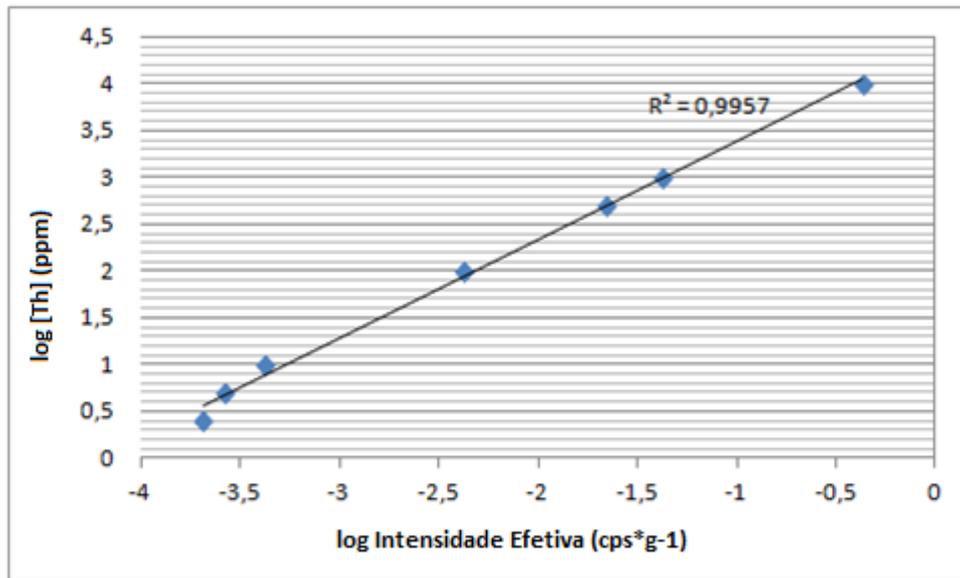


Figura 29: Curva de calibração em concentração referente ao pico do ^{208}Tl (2.614,53 KeV).

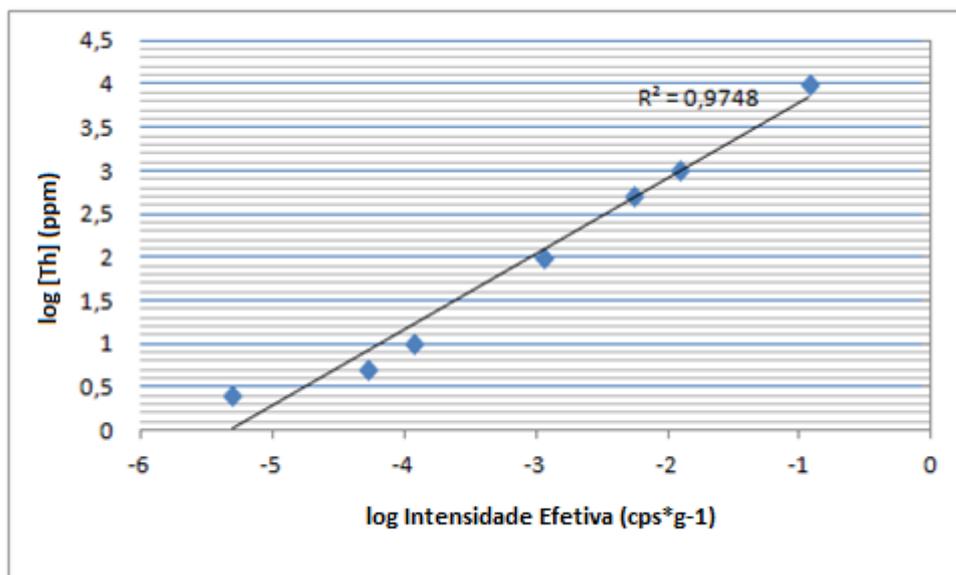


Tabela 19: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{208}Tl (2614,53 keV).

Código do Padrão	Massa (g)	Concentração (ppm _{Th})	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g ⁻¹)
NBL-106-A	50	10000	197,78	1142	0,013536985	5,760555441	0,115211109
NBL-107-A	50	1000	757,18	461	0,012728807	0,59610925	0,011922185
NBL-108-A	50	500	1204,34	348	0,013065548	0,275889398	0,005517788
NBL-109-A	48,96	100	6049,86	418	0,014681904	0,054410604	0,001111328
NBL-110-A	50	10	20584,6	391	0,01316657	0,005828212	0,000116564
LII-Th-1	50	5	26757,82	467	0,014816601	0,002636241	5,27248E-05
LII-Th-2	50	2,5	58764,76	816	0,013638008	0,000247866	4,95731E-06

Tabela 20: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{208}Tl (583,19 keV).

Código do Padrão	Massa (g)	Concentração (ppm _{Th})	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g ⁻¹)
NBL-106-A	50	10000	197,78	4288	0,049265198	21,63139008	0,432627802
NBL-107-A	50	1000	757,18	1604	0,043675298	2,074711347	0,041494227
NBL-108-A	50	500	1204,34	1373	0,04936622	1,090677289	0,021813546
NBL-109-A	48,96	100	6049,86	1542	0,048322323	0,206559608	0,004218946
NBL-110-A	50	10	20584,6	1165	0,035559842	0,021035866	0,000420717
LII-Th-1	50	5	26757,82	1326	0,036570065	0,012985542	0,000259711
LII-Th-2	50	2,5	58764,76	2487	0,032057736	0,010263546	0,000205271

A curva gerada referente ao decaimento alfa com intensidade efetiva do ^{224}Ra (240,986 keV) somada aos fotopicos próximos é descrita pela função $\log(C_{\text{Th}}) = 1,0992 \cdot \log(I_e) + 3,9249$ (Figura 30), com base nos dados da Tabela 21.

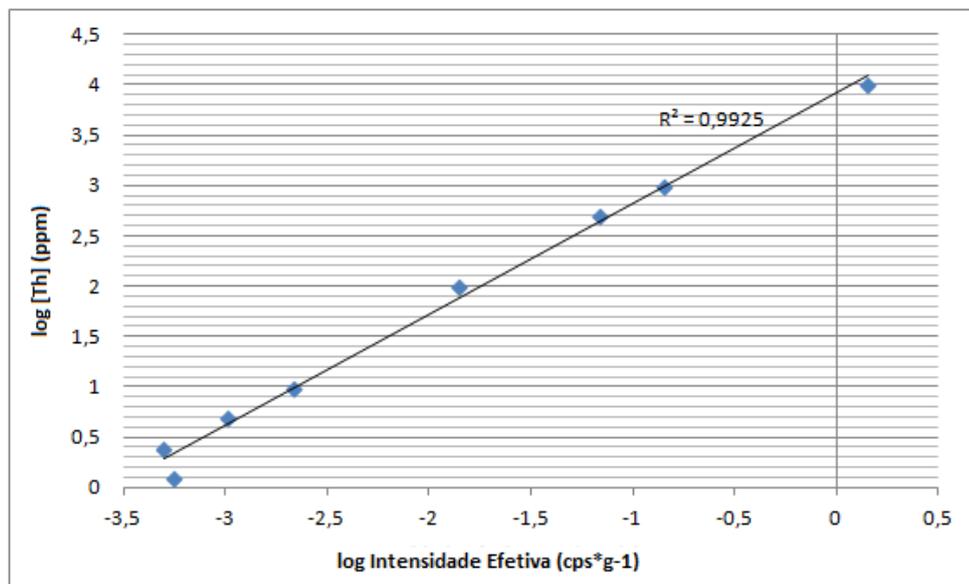
Figura 30: Curva de calibração em concentração referente ao fotopico ^{224}Ra (240,986 keV) e adjacentes.

Tabela 21: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{224}Ra (240,986 keV).

Código do Padrão	Massa (g)	Concentração (ppm Th)	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g-1)
NBL-106-A	50	10000	197,78	14064	0,094051741	71,10931338	1,420305233
NBL-107-A	50	1000	757,18	5425	0,094051741	7,164742862	0,141413822
NBL-108-A	50	500	1204,34	4214	0,094051741	3,499011907	0,068099203
NBL-109-A	48,96	100	6049,86	4677	0,094051741	0,773075741	0,013868954
NBL-110-A	50	10	20584,6	4174	0,094051741	0,202772947	0,002174424
LII-Th-1	50	5	26757,82	3895	0,094051741	0,145564923	0,001030264
LII-Th-2	50	2,5	58764,76	6991	0,094051741	0,118965856	0,000498282
LII-Th-3	50	1,25	56855,66	6938	0,094051741	0,122028308	0,000559531

A última curva de calibração em concentração gerada neste projeto tem como equação $\log(C_K) = 1,2133 * \log(I_e) + 7,6987$ (Figura 31) e foi obtida pelo pico gama do ^{40}K (1.460,8 keV) através dos padrões radioativos já mencionados. A concentração de potássio, em ppm, é representada por “ C_K ” e seus valores podem ser visualizados junto à tabela 22.

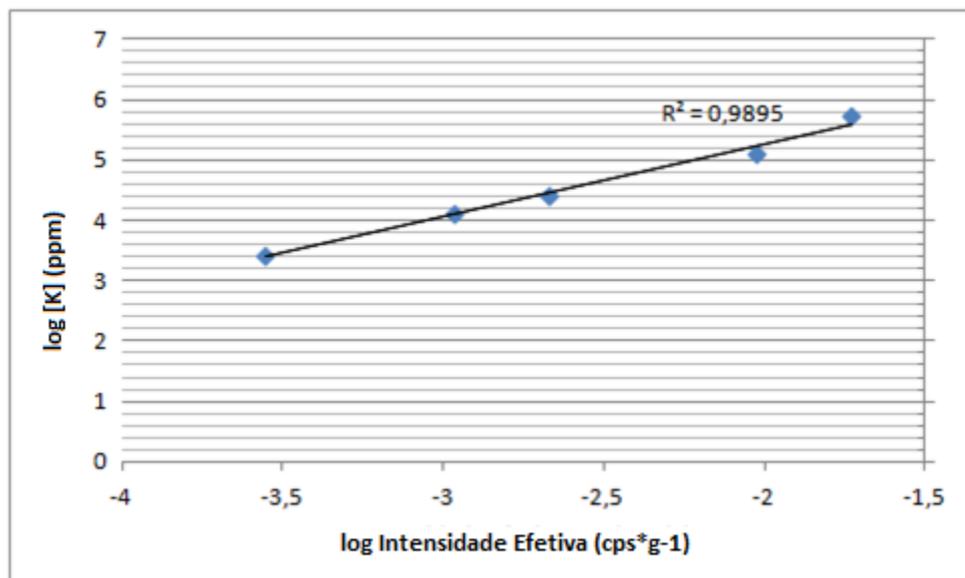
Figura 31: Curva de calibração em concentração referente ao pico do ^{40}K (1.460.830 keV)

Tabela 22: Dados de calibração em concentração referentes ao pico do ^{40}K .

Código do Padrão	Massa (g)	Concentração de K	Tempo de Contagem (segundos)	Número de Contagens	Taxa de Contagem BG (cps)	Taxa de Contagem (cps)	Intensidade efetiva (cps.g ⁻¹)
LII-KCl-1	50	52%	2353,66	2242	0,022315601	0,930243392	0,018604868
LII-KCl-2	50	25%	9508,32	4703	0,021197025	0,473422424	0,009468448
LII-KCl-3	50	5%	20929,32	2699	0,021881077	0,107076767	0,002141535
LII-KCl-4	50	2,50%	24908,12	1957	0,024316132	0,054252623	0,001085052
LII-KCl-5	50	0,50%	55580,48	1967	0,021399229	0,013990893	0,000279818

As curvas de calibração em atividade de concentração geraram resultados muito semelhantes com as calibrações acima expostas. A Figura 32 mostra a relação entre a atividade do padrão por massa ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$) e a intensidade efetiva ($\text{cps} \cdot \text{g}^{-1}$) relacionada ao pico do radioisótopo ^{214}Bi de energia 1120,19 keV, cuja função é dada por $\log(A_U) = 1,0465 \cdot \log(I_e) + 2,6437$, onde A_U é a atividade em $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ do padrão de urânio. Já a equação que exprime a calibração através do mesmo radioisótopo de energia 1764,49 keV é $\log(A_U) = 1,034 \cdot \log(I_e) + 2,7495$ (Figura 33).

Figura 32: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{214}Bi (1.120,19 keV).

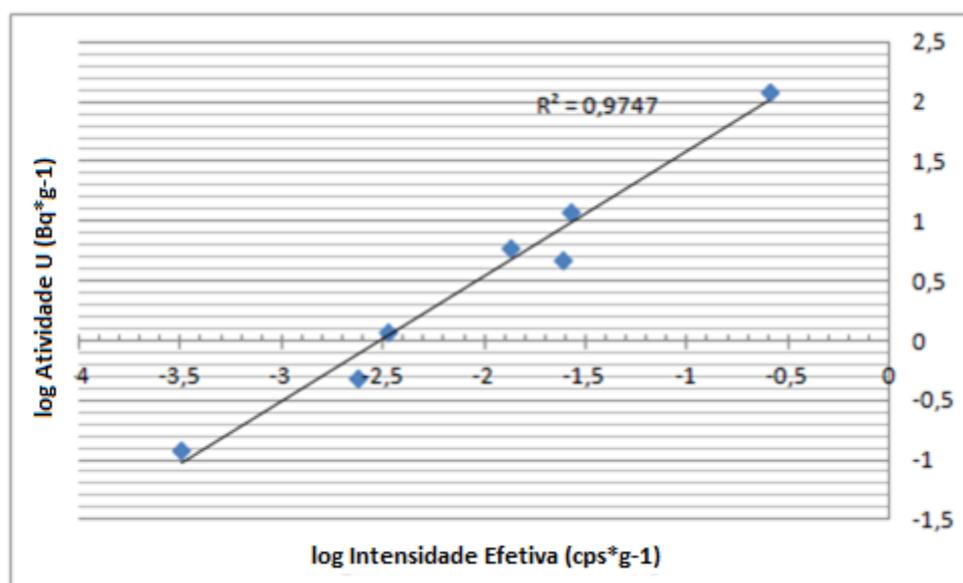
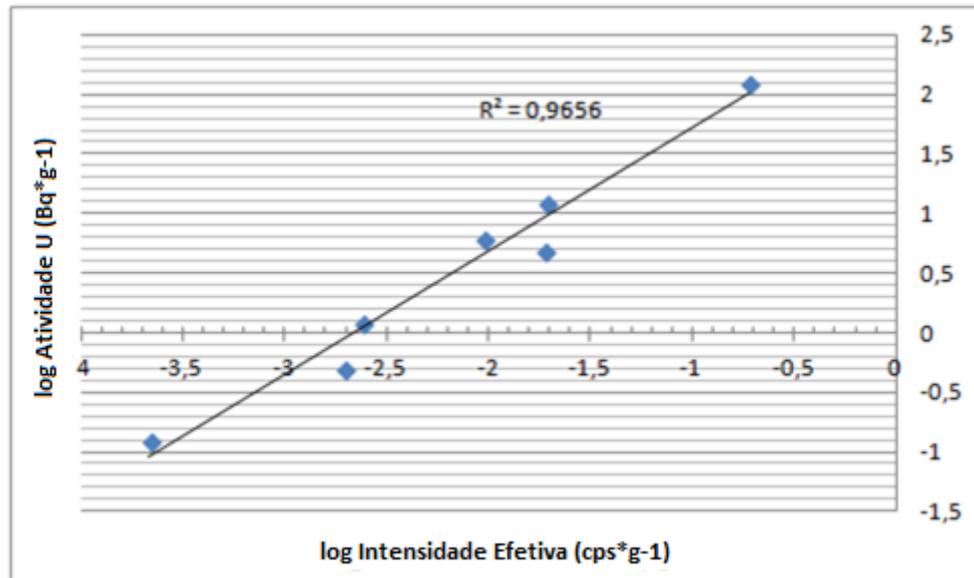
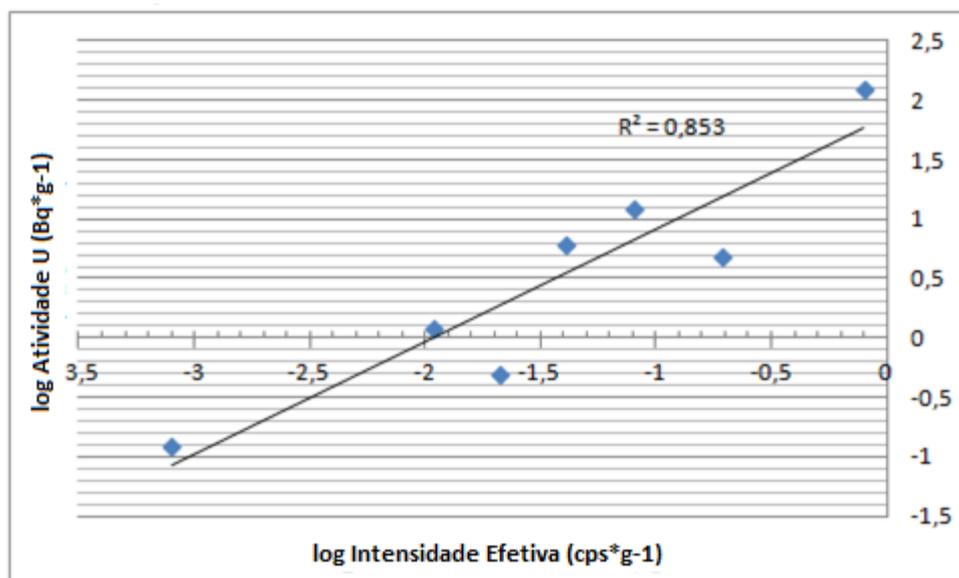


Figura 33: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{214}Bi (1.764.49 keV)



A função que descreve o gráfico referente ao pico sobreposto de emissão alfa é expressa por $\log(A_U) = 0,9462 \cdot \log(I_e) + 1,8661$ e pode ser visualizada na Figura 34, juntamente com seu valor de R^2 .

Figura 34: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico sobreposto do ^{226}Ra e ^{235}U .



O mesmo foi aplicado aos padrões de tório e potássio, sendo que para o primeiro as funções são dadas pelas curvas das Figuras 35 e 36 e descritas por $\log(A_{Th}) = 1,0487 \cdot \log(I_e) + 2,0406$ e $\log(A_{Th}) = 0,8734 \cdot \log(I_e) + 2,2729$, conforme dados referentes ao ^{208}Tl .

Figura 35: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao picodo ^{208}Tl (583 keV).

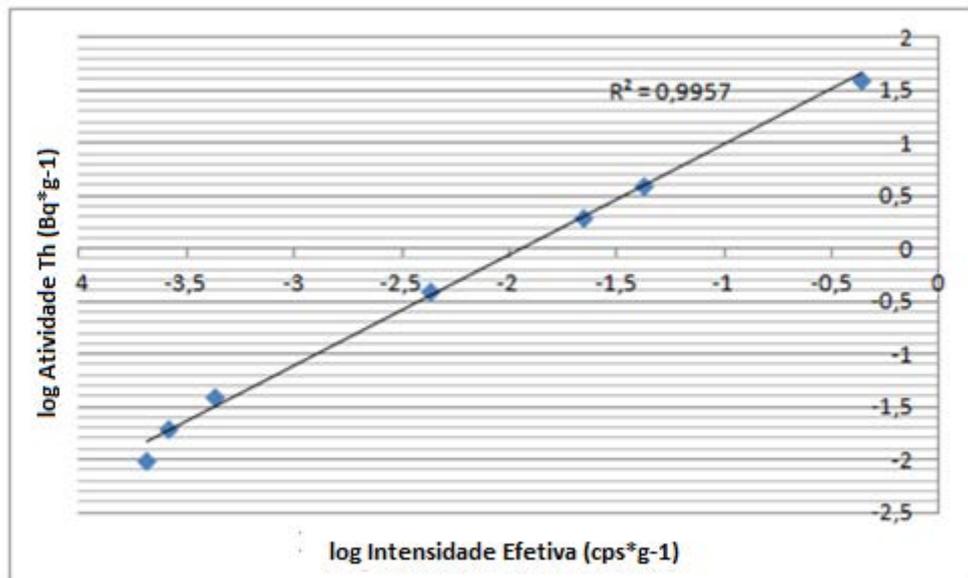
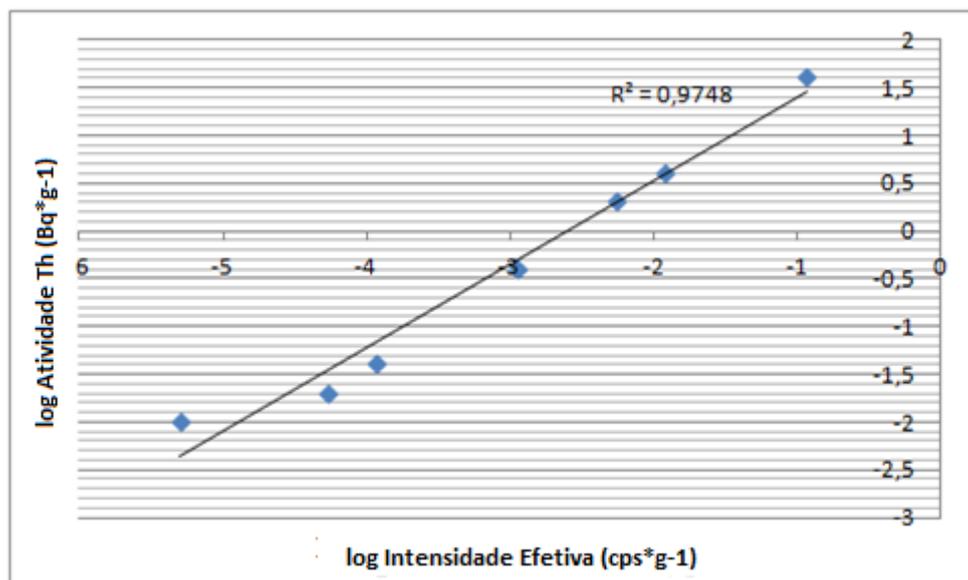


Figura 36: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{208}Tl (2.614 keV)



As funções que descrevem as curvas de calibração referentes ao ^{228}Ac de energias 911,21 e 968,97 keV são: $\log(A_{\text{Th}}) = 1,0619 \cdot \log(I_e) + 2,311$ e $\log(A_{\text{Th}}) = 1,0838 \cdot \log(I_e) + 2,4707$, respectivamente (Figuras 37 e 38).

Figura 37: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{228}Ac (911,21 keV)

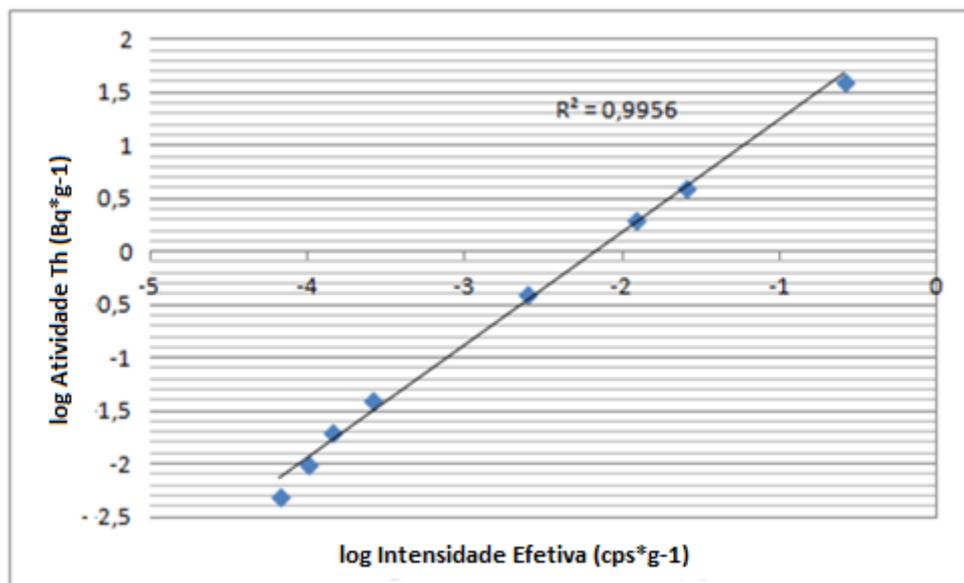
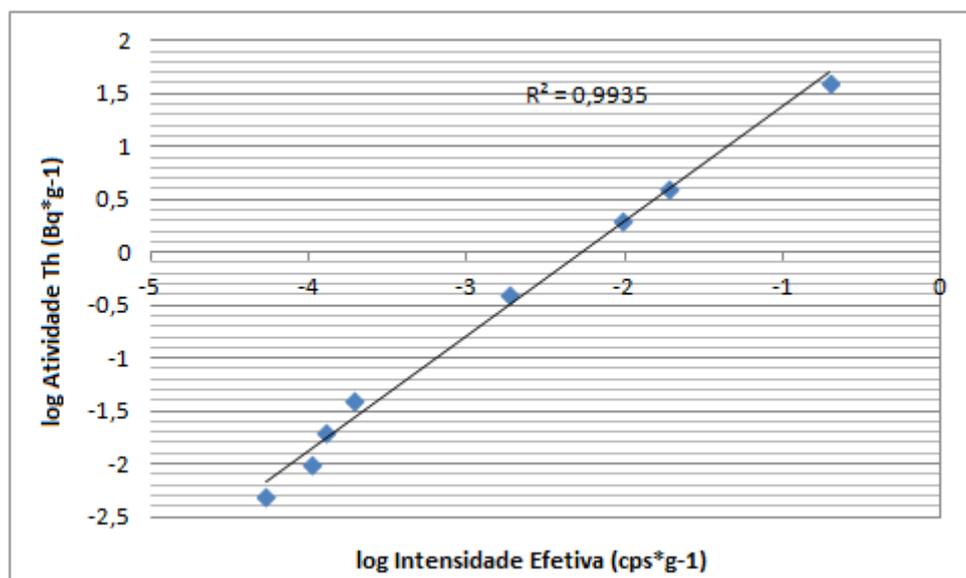
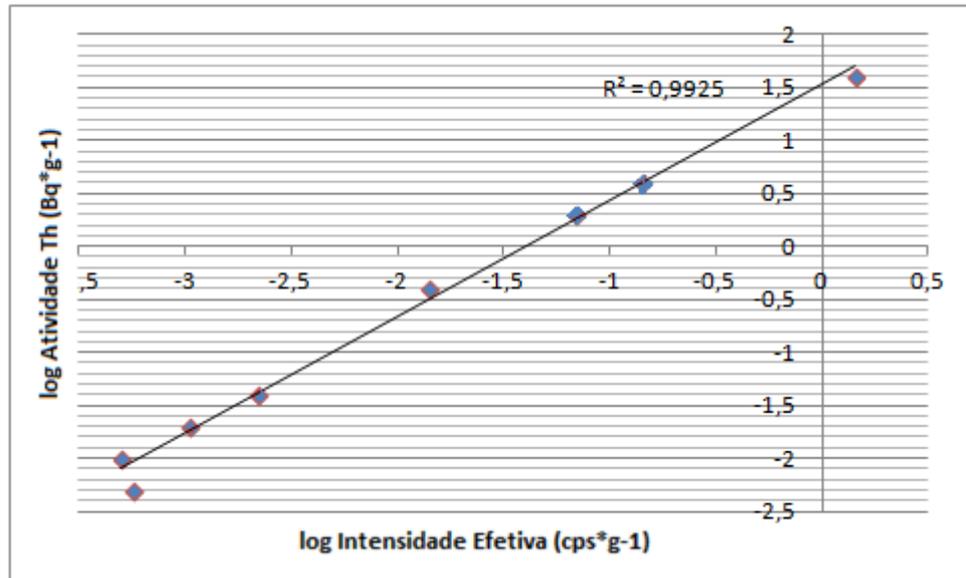


Figura 38: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{228}Ac (968,97 keV)



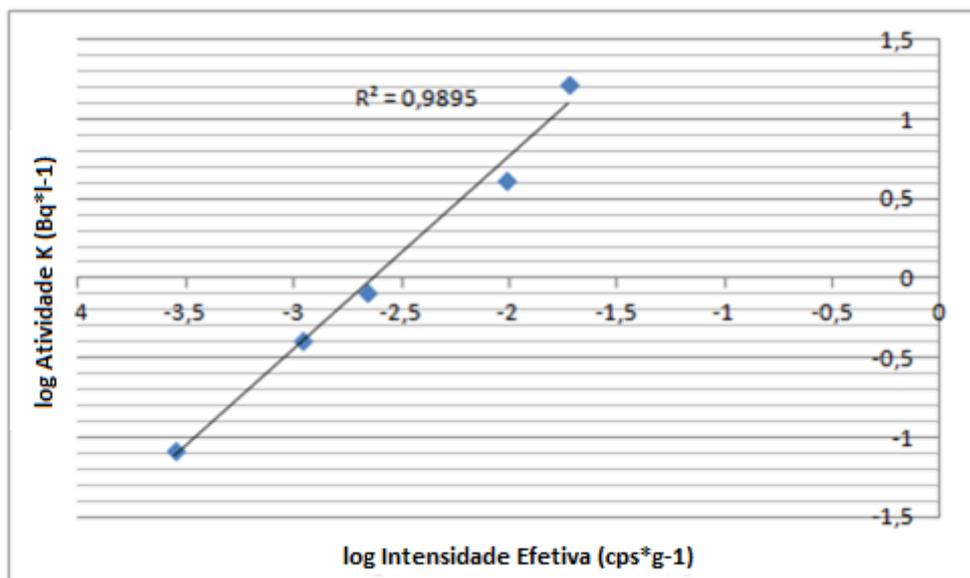
A curva de calibração em concentração de atividade gerada através do ^{224}Ra é descrita pela equação $\log(A_{\text{Th}}) = 1,0992 \cdot \log(I_e) + 1,5331$ (Figura 39) com um coeficiente de correlação mais uma vez muito próximo de 1.

Figura 39: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{224}Ra (240,986 keV)



Por último, o gráfico obtido a partir do padrão de potássio (KCl) é definido pela função $\log(A_{\text{U}}) = 1,2133 \cdot \log(I_e) + 3,1941$ (figura 19) com base no pico de energia 1.461 keV gerado no decaimento β^- do ^{40}K (Figura 40).

Figura 40: Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) referente ao pico do ^{40}K (1.461 keV)

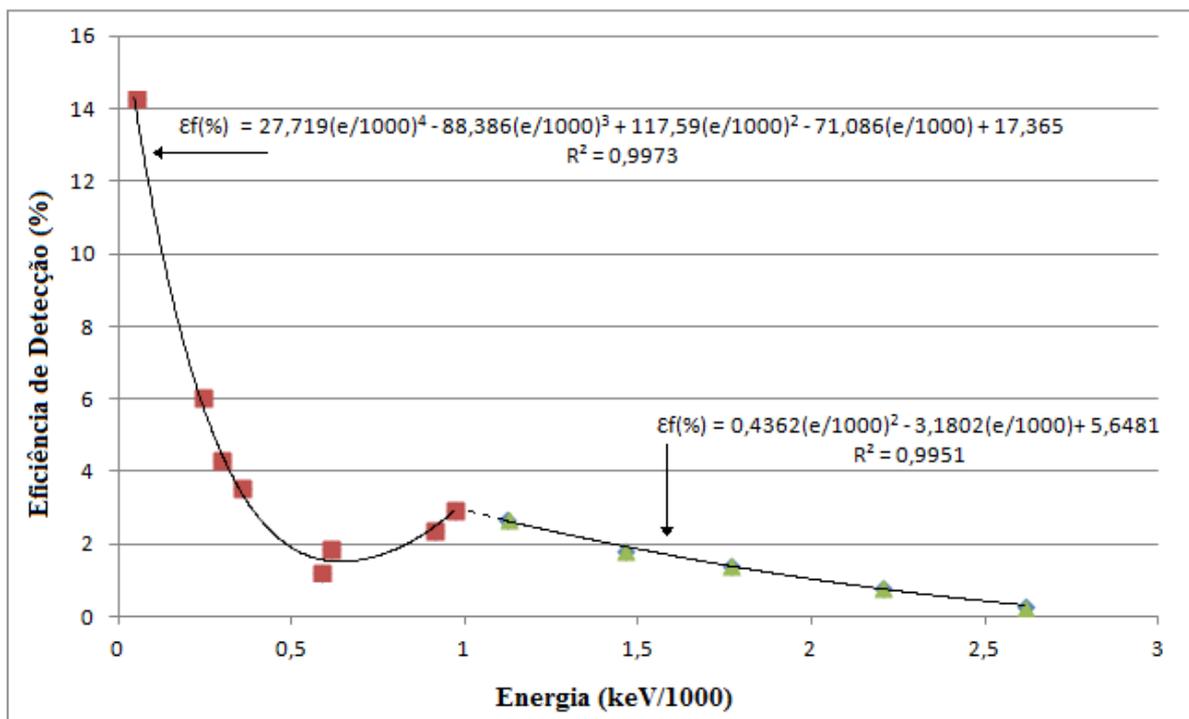


4.2- Curva de Eficiência de Detecção

Valores de eficiência de detecção para cada um dos 13 radionuclídeos de diferentes energias gama foram obtidos e acabaram por corroborar o que já era esperado para o sistema espectrométrico, cuja tendência geral da curva de eficiência (Figura 41) indica um decréscimo nos valores de eficiência de detecção (ϵ_f) conforme o aumento da energia gama observada, provavelmente em decorrência da dispersão de energia, absorção e influência da geometria da amostra.

Optou-se pelo ajuste de dois polinômios distintos, um de grau quatro e função descrita por $\epsilon_f(\%) = 27,719(e/1000)^4 - 88,386(e/1000)^3 + 117,59(e/1000)^2 - 71,086(e/1000) + 17,365$, cujo domínio abrange valores de energia (e) mais baixos do espectro gama. O outro polinômio, de grau dois, descreve a curva pela equação: $\epsilon_f(\%) = 0,4362(e/1000)^2 - 3,1802(e/1000) + 5,6481$, sendo este último representativo de energias mais elevadas.

Figura 41: Curva de eficiência de detecção (%) do sistema espectrométrico onde dois polinômios distintos foram ajustados, em que “e” corresponde à energia e ϵ_f aos valores de eficiência de detecção.



4.3- Atividade alfa e beta total das amostras

Os resultados de atividade beta total obtidos por meio da técnica de análise proposta (Anexo 4) se mostraram significativamente mais elevados com o emprego do radionuclídeo ^{208}Tl quando comparados aos valores gerados pelo ^{228}Ac , apresentando médias globais de 2,2 e 0,65 Bq.L^{-1} , respectivamente, o que contraria a previsão de resultados semelhantes para ambos com base na garantia de equilíbrio secular dos padrões de tório utilizados. Essa diferença observada poderia ser explicada pela curva de eficiência ajustada, dificuldade na delimitação mais precisa dos picos menos intensos do ^{228}Ac e/ou possível escape de radônio do sistema e consequente influência no cálculo de eficiência de detecção

Em termos comparativos, a contribuição dos radionuclídeos da série do tório na atividade beta total, representado pelo ^{208}Tl , aparenta ser maior do que aquela observada para o ^{214}Bi , pertencente à série de decaimento do urânio. Esse fator estaria diretamente associado à concentração desses dois elementos na água amostrada, embora a solubilidade e incorporação do tório em águas seriam teoricamente menores do que aquelas para o urânio. O fator da concentração dos radionuclídeos naturais nas águas é uma questão complexa, pois não leva em conta apenas tório e urânio, mas sim todos os radionuclídeos filhos das séries de decaimento. Já a comparação das médias referentes às atividades parciais geradas pelo ^{214}Bi e ^{228}Ac (0,16 e 0,07 Bq.L^{-1} , respectivamente) corroborariam a ideia expressa acima, com a série do urânio desempenhando o papel majoritário na qualidade radiológica das águas.

Os valores relativamente baixos observados para o ^{40}K (média de 0,43 Bq.L^{-1}) poderiam ser explicados pela baixa concentração desse elemento nas amostras devido à sua absorção nas argilas durante a circulação das águas, apesar do potássio ser um componente com teores relativamente elevados em rochas e minerais (SZIKSZAY e TEISSEDRE, 1977). De uma maneira geral, os resultados de atividade beta total superaram os valores de referência de 1,0 Bq.g^{-1} proposto por WHO (2011) em praticamente 20% daqueles calculados através do ^{228}Ac e em 77% dos resultados gerados pelo ^{208}Tl . Amostras oriundas de sistemas aquíferos do tipo fraturado de terrenos cristalinos apresentaram os valores mais elevados de atividade beta total (médias globais de 3,06 Bq.L^{-1} segundo cálculo através ^{208}Tl e 1,03 Bq.L^{-1} com base no ^{228}Ac), em especial algumas fontes de Caxambu, Lambari, Cambuquira, Poços de Caldas e Serra Negra. A Estância Hidromineral de Caxambu foi a localidade cujas águas exibiram alguns dos maiores valores de atividade beta total, como por exemplo, as fontes Ernestina

Guedes (PATB16, superior a 10 Bq.g^{-1}), Duque de Saxe (PATB21), D. Pedro II (PATB17) e Mayrink (PATB20).

A atividade alfa total, por sua vez, excedeu o valor de referência de $0,5 \text{ Bq.L}^{-1}$ em praticamente todas as 108 amostras analisadas. Mais uma vez, a contribuição do radionuclídeo representante da série de decaimento do tório (^{224}Ra , média de $2,58 \text{ Bq.L}^{-1}$) na atividade alfa total foi superior aquela obtida para a série do urânio (^{226}Ra , média de $0,56 \text{ Bq.L}^{-1}$) na maioria das amostras. De uma maneira geral, os valores mais elevados observados confirmam os mesmos municípios supracitados no contexto dos aquíferos fraturados, com destaque para o Poço 4 de Lambari-MG (PABT22, $13,8 \text{ Bq.L}^{-1}$). A média global da atividade alfa total obtida para estes aquíferos fraturados do contexto de terrenos cristalinos foi de $3,9 \text{ Bq.L}^{-1}$.

O contexto geológico dessas localidades é sem dúvida um dos fatores determinantes para a incorporação de tório, urânio e seus radionuclídeos filhos nas águas subterrâneas, conforme o previsto. São associados à ortognaisses, migmatitos, sequências metassedimentares, veios pegmatóides e ocorrência de traquitos, sienitos e brechas alcalinas, estas últimas nas redondezas do parque das águas de Caxambu, onde foram coletadas as amostras com os mais altos valores de atividade alfa e beta total. A variação da atividade, mesmo entre as fontes inseridas em um mesmo contexto geológico, poderia ser explicada por fatores locais como pH, Eh, presença de matéria orgânica e hidróxidos, que tendem a ter influência direta na incorporação de elementos, dentre eles os radioativos, no sistema hídrico.

As amostras de água subterrânea pertencentes à aquíferos porosos da Bacia do Paraná mostraram valores de atividade geralmente menores do que aquelas águas associadas aos aquíferos fraturados de áreas cristalinas. As médias calculadas para este contexto foram: $1,64 \text{ Bq.L}^{-1}$ para beta total gerado pelo ^{208}Tl , $0,4 \text{ Bq.L}^{-1}$ para beta total referente ao ^{228}Ac e $2,65 \text{ Bq.L}^{-1}$ para atividade alfa total. Em muitos casos os picos gama relacionados ao decaimento do ^{214}Bi , ^{228}Ac e ^{226}Ra não foram sequer identificados no espectro gama, como um prognóstico da baixa radioatividade e diminuta concentração destes radionuclídeos nas amostras. Entretanto, algumas exceções foram identificadas em poços de Termas de Ibirá, Araçatuba e Jales com valores máximos de atividade alfa e beta total de 11 e 7 Bq.L^{-1} , respectivamente. Essas “anomalias” radiológicas poderiam ser alvos de futuras investigações em uma escala maior de detalhes em razão da possibilidade de contaminação de origem

antrópica relacionada à atividade agrícola, mais precisamente aos adubos fosfatados que podem conter elementos radioativos em sua composição. No meio natural, seria de esperar que a contribuição de elementos radioativos no contexto de bacias siliciclásticas se desse basicamente por minerais resistatos acessórios em arenitos, como é o caso dos zircões (U e Th) e arenitos arcoseanos (^{40}K associado a feldspatos).

A Tabela 23 compara resultados de trabalhos anteriores envolvendo algumas das amostras analisadas nesse trabalho com seus valores de atividade alfa obtidos (^{226}Ra e ^{224}Ra). Neste caso, Beato (1999) e Bonotto (2014) quantificam isótopos do gás radônio, com o ^{222}Rn e ^{220}Rn pertencentes às séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th , respectivamente. Já Bonotto (2015) analisa a atividade referente a dois isótopos de rádio das mesmas séries, dentre eles o ^{226}Ra . Ao observar os valores, pode-se notar a grande variabilidade de resultados em decorrência do emprego de diferentes métodos de análise, embora as fontes de Caxambu se configurem como aquelas onde foram definidos os maiores níveis de atividade, corroborando, em termos qualitativos, os dados obtidos na literatura. Entretanto, Bonotto (2014) e Bonotto (2015) demonstram que a série do ^{238}U é a maior contribuinte à atividade radioativa dessas águas.

Tabela 23: Comparação com resultados de atividade obtidos por outros autores em algumas das fontes analisadas. Os valores das duas colunas da extrema-direita representam os dados gerados nesse trabalho.

Fonte	Código	Cidade	Szikszay & Teissedre (1981) Radioatividade (Bq/l)	Beato (1999) 222Rn (Bq/l)	Bonotto (2014)		Bonotto (2015)		226Ra	224Ra
					220Rn (Bq/l)	226Ra (Bq/l)	228Ra (Bq/l)	Bq/L	Bq/L	
Vilela	PABT104	Á. Da Prata	>672,66 (fortemente rad.)	-	104,3 ± 3,4	0,226±0,186	0,8561±0,2401	1,9425±0,0801	0,494597	0,408621
Vitória	PABT105	Á. Da Prata	>672,67 (fortemente rad.)	-	53,3 ± 1,8	0,063±0,081	0,2819±0,167	0,0842±0,0035	2,250777	1,979372
S. Jorge	PABT30	Lindóia	66,6 - 134,31 (fracamente rad.)	-	-	-	-	-	0,739801	6,031467
S. Roque	PABT93	Á de Lindoia	-	-	5,0 ± 0,5	<0,004	0,1566±0,0626	<0,0068	1,275948	1,015351
Beleza	PABT57	Á de Lindoia	134,31 - 672,66 (radioativa)	-	8,3 ± 0,7	0,067±0,070	0,1044±0,0626	<0,0061	<LD	1,33909
Carlos Gomes	PABT27	T de Ibirá	-	-	3,4 ± 0,4	0,026±0,033	0,2084±0,0834	<0,0088	0,580339	2,865393
Curie	PABT39	Á de Lindoia	-	-	9,2 ± 0,7	0,089±0,086	0,1148±0,0626	0,1283±0,0035	<LD	4,682731
Italianos	PABT33	S Negra	-	-	5,8 ± 0,6	0,026±0,037	0,1566±0,0731	0,0439±0,003	0,177489	2,746926
S. Carlos	PABT34	S Negra	-	-	10,8 ± 0,7	0,015±0,022	0,1775±0,0731	0,1811±0,0096	0,543991	1,284563
Sta. Luzia	PABT35	S Negra	-	-	25,0 ± 1,2	0,181±0,133	0,1148±0,0626	0,2747±0,0164	<LD	2,490147
St. Agostinho	PABT36	S Negra	-	-	31,4 ± 1,4	0,240±0,148	0,1044±0,1044	<0,01	1,196445	1,61433
Brunhara	PABT37	S Negra	-	-	30,2 ± 1,3	0,418±0,222	0,1148±0,0626	<0,0113	<LD	1,961993
Laudo Natel	PABT38	S Negra	-	-	6,2 ± 0,6	0,015±0,026	0,1984±0,0835	<0,0097	1,195465	6,44232
Sant'Anna	PABT40	S Negra	-	-	23,9 ± 1,1	0,026±0,037	0,1044±0,0522	0,0052±0,0029	0,492149	2,2759
Bioleve	PABT41	Lindóia	-	-	2,4 ± 0,4	<0,004	0,1462±0,0626	<0,0069	0,120845	1,737544
S Benedito	PABT42	Lindóia	-	-	10,3 ± 0,7	0,056±0,063	0,1879±0,1461	<0,0091	<LD	2,729494
Ademar de Barros	PABT26	T de Ibirá	-	-	2,7 ± 0,4	0,026±0,041	0,0835±0,0418	<0,0067	<LD	<LD
Saracura	PABT28	T de Ibirá	-	-	3,6 ± 0,4	0,026±0,041	0,125±0,0729	0,1135±0,0029	<LD	3,583853
Seixas	PABT29	T de Ibirá	-	-	2,4 ± 0,3	<0,004	0,167±0,0731	<0,0074	<LD	11,18953
Poço 4 (LA4)	PABT22	Lambari	-	66,330685	9,6 ± 0,7	0,081±0,081	0,4489±0,1462	0,1124±0,0036	2,293372	11,27563
Poço 2 (LA2)	PABT23	Lambari	-	51,261645	10,3 ± 0,7	0,259±0,148	0,4489±0,1566	0,191±0,005	0,812522	2,001554
Poço 1 (LA1)	PABT24	Lambari	-	-	8,2 ± 0,6	0,078±0,081	0,3341±0,1148	0,2138±0,0041	<LD	<LD
Poço 3 (LA3)	PABT25	Lambari	-	82,07245	13,5 ± 0,8	0,237±0,148	0,3967±0,1253	0,2376±0,0055	1,152663	0,78659
7 Bis	PABT01	S Lourenço	-	-	1,6 ± 0,3	0,022±0,030	0,3132±0,1044	0,1391±0,0046	0,942983	1,71213
Sulfurosa	PABT02	S Lourenço	-	-	4,1 ± 0,4	0,041±0,052	0,3967±0,1357	0,7085±0,0094	1,427037	1,724882
Alcalina	PABT04	S Lourenço	-	0,80727	1,1 ± 0,2	0,048±0,056	0,2401±0,0731	0,4481±0,0084	1,197279	1,225956
Vichy	PABT07	S Lourenço	-	13,050865	4,4 ± 0,5	0,078±0,078	0,4594±0,1461	0,5756±0,0084	0,849617	2,634627
Ferruginosa	PABT06	S Lourenço	-	-	4,0 ± 0,4	0,033±0,044	0,2506±0,1775	0,176±0,0039	<LD	0,96657
Primavera	PABT05	S Lourenço	-	-	4,8 ± 0,6	0,041±0,052	0,6473±0,1775	1,9159±0,0336	1,104869	0,940937
Roxo Rodrigues	PABT08	Cambuquira	-	12,781775	1,5 ± 0,3	0,092±0,092	0,3236±0,1253	0,6344±0,0081	<LD	2,741017
Com. Augusto Ferreira	PABT09	Cambuquira	-	18,432665	3,0 ± 0,4	0,100±0,089	0,2088±0,0731	0,4665±0,0068	<LD	2,990283
Fernandes Pinheiro	PABT10	Cambuquira	-	125,530485	13,4 ± 0,9	0,067±0,074	0,1775±0,0731	0,1649±0,0055	<LD	2,894078
Souza Lima	PABT11	Cambuquira	-	38,345325	0,8 ± 0,2	<0,004	0,2088±0,0835	0,479±0,008	<LD	4,769705
Regina Werneck	PABT12	Cambuquira	-	14,53086	4,6 ± 0,5	0,333±0,185	0,1775±0,0731	0,5926±0,0067	<LD	2,244553
Mayrink	PABT20	Caxambu	-	275,951795	35,3 ± 1,5	0,444±0,259	0,4072±0,1357	<0,0075	1,676305	5,395057
Ernestina Guedes	PABT16	Caxambu	-	-	10,1 ± 0,8	0,492±0,222	2,6726±0,428	0,0469±0,0008	2,813544	8,829483
Viotti	PABT18	Caxambu	-	414,802235	45,9 ± 1,8	0,418±0,259	0,2819±0,094	0,256±0,0054	1,002407	3,932065
D Pedro II	PABT17	Caxambu	-	413,32224	40,7 ± 1,8	0,063±0,074	0,3236±0,1461	0,4024±0,0096	0,356586	8,034252
Duque de Saxe	PABT21	Caxambu	-	30,40717	8,0 ± 0,7	0,192±0,144	0,5638±0,1775	0,7965±0,0112	1,668662	6,053491
Da Leopoldina	PABT13	Caxambu	-	50,454375	18,4 ± 1,1	0,081±0,085	0,1566±0,0731	0,2769±0,0066	<LD	3,359739
Da Isabel/Conde d'Eu	PABT15	Caxambu	-	29,86899	5,3 ± 0,6	0,148±0,122	1,1066±0,250,6	0,7538±0,014	<LD	1,613871
Frahya	PABT64	P Caldas	-	-	23,2 ± 1,2	0,866±0,296	0,2401±0,094	<0,0069	<LD	8,891873
Macacos	PABT66	P Caldas	-	-	2,0 ± 0,3	<0,004	0,1042±0,0625	0,0403±0,0031	0,549239	2,81657
XV de Novembro	PABT90	P Caldas	-	-	16,2 ± 0,9	0,096±0,089	0,2192±0,0835	0,0491±0,0028	0,412479	3,357077
Quisisana	PABT91	P Caldas	-	-	8,4 ± 0,7	0,052±0,067	0,3132±0,1148	<0,0064	0,68971	2,125902
Samaritana	PABT31	P Rio Verde	-	-	10,4 ± 0,8	0,178±0,141	0,1357±0,0626	<0,0076	1,383725	2,437946
Amorosa	PABT32	P Rio Verde	-	-	31,4 ± 1,4	0,015±0,026	0,1566±0,094	<0,0078	0,737655	1,709656

Outro exemplo de incompatibilidade de resultados é a fonte Vilela localizada em Águas da Prata-SP e classificada como fortemente radioativas por Szikszay e Teissedre (1981), fato este não confirmado pelos resultados de atividade obtidos, embora Szikszay e Teissedre (1977) relataram ainda a existência de urânio associado ao zircônio em fendas dos arenitos locais.

5.0- Conclusões

Os resultados obtidos atestaram a viabilidade da metodologia proposta como alternativa ao método proposto por Bonotto et al. (2009) com base nas calibrações em energia (keV), concentração (ppm) e concentração em atividade ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) atestadas por coeficientes de correlação bastante significativos. Os cálculos envolvendo a eficiência de detecção do sistema com a interpolação dos dois polinômios compreenderam uma série de radionuclídeos e indicaram o já esperado decréscimo do parâmetro eficiência em função do aumento da energia gama.

A calibração do sistema em alfa se mostrou inicialmente como um desafio devido ao baixo número de possibilidades e picos viáveis nas séries de decaimento do ^{232}Th e ^{238}U quando comparados aos de decaimento beta, principalmente devido a fatores como baixas intensidades dos fotopicos e energias gama. Não houve alternativa a não ser o emprego de picos sobrepostos com posteriores cálculos para o isolamento da taxa de decaimento referentes aos radionuclídeos ^{226}Ra (série do ^{238}U) e ^{224}Ra (série do ^{232}Th).

De maneira geral, os resultados obtidos excederam os valores de referência propostos por WHO (2011) no que se refere à atividade alfa e beta total nas águas, com majoritária contribuição do tório e seus radionuclídeos filhos à radioatividade das amostras. A discrepância nos valores de atividade beta parciais obtidos pela calibração segundo os radionuclídeos ^{208}Tl e ^{228}Ac da série do tório indicariam um possível problema na delimitação mais precisa dos picos de menor intensidade do ^{228}Ac , no ajuste da curva de eficiência ou até mesmo o escape de radônio do sistema e perda do equilíbrio radioativo dos padrões. Para que se evite qualquer adversidade em relação a possíveis alterações no equilíbrio secular devido

ao escape de Rn, é necessária a escolha, sempre que possível, de radionuclídeos anteriores à formação deste gás, como é o caso do ^{228}Ac . Infelizmente não foi encontrado nenhum pico viável “pré-radônio” na série do ^{238}U para comparação com os valores de atividades obtidos segundo o ^{214}Bi .

Níveis mais elevados de atividade alfa e beta total foram observados, na maioria das vezes, em amostras oriundas de fontes inseridas no contexto de sistemas aquíferos fraturados associados a rochas cristalinas. São exemplos algumas fontes de Caxambu, Cambuquira, São Lourenço, Lambari, Poços de Caldas, Serra Negra e Águas de Lindóia, e que de maneira geral são associadas à ortognaisses, migmatitos, sequências metassedimentares, pegmatitos, etc. Intrusões e brechas alcalinas são descritas pela literatura nas redondezas de Caxambu e certamente possuem relação direta com algumas das fontes mais radioativas observadas (Ernestina Guedes, D. Pedro II e Duque de Saxe, por exemplo). Por outro lado, águas subterrâneas coletadas de poços relacionados aos aquíferos da Bacia do Paraná apresentaram valores de atividade alfa e beta total relativamente menores, embora existam algumas exceções em ambos os casos.

Como já era de se esperar, o fator geológico se mostrou de extrema importância no entendimento da caracterização radiológica natural das águas. Terrenos constituídos por ortognaisses, granitos, pegmatitos graníticos, rochas alcalinas e demais litologias associadas à concentrações mais elevadas de urânio e tório tendem a apresentar águas subterrâneas mais significativas do ponto de vista radiológico, embora fatores locais como pH e Eh possam também atuar localmente na dinâmica da troca iônica entre a água e o meio geológico no qual o aquífero está inserido. Uma proposta para futuros trabalhos seria a investigação mais detalhada a respeito do potencial de contaminação das águas subterrâneas por ações antrópicas, como a agricultura, e sua influência na caracterização radiológica dessas águas. Outra linha de investigação interessante seria a análise da influência do ciclo sazonal natural na atividade alfa e beta total das águas subterrâneas.

No que se diz respeito à metodologia de um modo geral, a possibilidade do emprego de um espectrômetro gama associado ao detector HPGe como um meio único para a determinação da atividade alfa e beta total é, sem dúvida, uma grande conquista da metodologia proposta. Diversos outros procedimentos relacionados à espectrometria alfa, como, por exemplo, a evaporação total da amostra e/ou deposição em discos de alumínio, com

grande potencial de perda de material ao longo do processo e absorção das partículas radioativas, são fundamentais em outros métodos radioanalíticos (ISO 9696/9697, EPA, EPA Modificado, etc). Outros métodos de caracterização radiológica requerem ainda o uso de reagentes químicos como $\text{Ba}(\text{SO}_4)$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (método radioanalítico de coprecipitação) e consequente destruição da amostra original, diferentemente do método desenvolvido ao longo desse trabalho.

6.0- Referências bibliográficas

- ALLEY, W.M. **Regional ground-water quality**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993, pp. 423-441.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim Instituto Geográfico e Geológico**. v. 41, p. 169-263, 1964.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **Mapa de afloramento dos aquíferos do Brasil: Disponibilidade de águas subterrâneas nos principais sistemas aquíferos**. Brasília: ANA, versão 1, 2013. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2014/MapaAreasDeAfloramentoDosAquiferosDoBrasil.pdf>> Acesso em: 2 fev. 2016
- ANDERSON, H.L. Alpha particle thickness gauge using solid state detector. **Nuclear Instruments and Methods** 12: 111-114, 1961.
- ARTUR, A. C., WERNICK, E. Terrenos policíclicos e estágios de evolução crustal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXXIII. 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBG, 1984, v. 7, p. 3081 – 3090.
- BARBOSA, O. 1954. Évolution Du Géosynclinal Espinhaço. In: Int. Geol. Congr, XIX. 1952, Argelia. Section XII, p. 2-37.
- BEATO, D.A., OLIVEIRA, F.A., VIANA, H.S. **Projeto Circuito das Águas do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 1999. 142 p.
- BITTENCOURT, I.; TALTASSE, P. Mapa Geológico de Águas da Prata (SP). São Paulo: IG/USP, 1972.
- BONOTTO, D.M. **Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani**. São Paulo: Editora UNESP, 2004. 251 p.
- BONOTTO, D.M. & SILVEIRA, E.G. **Geoquímica do urânio aplicada a águas minerais**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 154 p, 2006.
- BONOTTO, D.M., BUENO, T.O., TESSARI, B.W., SILVA, A., The natural radioactivity in water by gross alpha and beta measurements. **Radiation Measurements**, 44, p. 92-101, 2009.
- BONOTTO, D.M. Natural radionuclides in major aquifer systems of the Paraná sedimentary basin, Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, 69, p. 1572- 1584, 2011.

BONOTTO, D. M. ^{222}Rn , ^{220}Rn and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, 132: p. 21 – 30, 2014.

BONOTTO, D. M. ^{226}Ra e ^{228}Ra in mineral waters of southeast Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 74: p. 839 – 853, 2015.

BOYLE, R.W. **Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits**, Amsterdam-Oxford-New York : Elsevier-Scientific Publishing Company, 1982. 498 p.

CAMPOS NETO, M. DA C. et al. A porção ocidental da faixa Alto do Rio Grande SP/MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXXVI. 1990, Natal. **Anais...Natal: SBG**, 1990, p. 2615-2630.

CAMPOS NETO, M. DA C. **A porção ocidental da faixa Alto do Rio Grande: ensaio de evolução tectônica**. 1991. 210 p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

CETESB (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL). **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2004-2006**. São Paulo: CETESB Série Relatórios Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2007, 199 p.

CETESB (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL). **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2010-2012**. São Paulo, CETESB. Série Relatórios, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2013. 185p.

COCCO, G.; FANFANI, L.; ZANAZZI, P.E. Potassium. In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) **Handbook of Geochemistry**. New York: Springer-Verlag, 1969. v. 2, cap. 19

COELHO, R. C. **Estudo hidroquímico e isotópico do aquífero bauru, sudoeste do Estado de São Paulo**. 1996. 103 f. Dissertação (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CHU, S.Y.F., EKSTRÖM, L.P., FIRESTONE, R.B., 1999. **The Lund/LBNL Nuclear Data Search**. Disponível em: <<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/index.asp>> Acesso em 09/06 de 2015.

CPRM (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL) **SIAGAS-Sistema de Informações de Água Subterrânea** (2010), Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisacomplexa.ph>> Acesso em 07/08 de 2016.

CPRM (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL). **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo - nota técnica**. CPRM, 2014, 45 p.

DEL REY, A. C. **Estudo hidrogeotérmico da região de Águas de Lindóia, Amparo e Socorro – nordeste do Estado de São Paulo**. 1989, 124p. Dissertação (Mestrado em geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de Águas Subterrâneas - Regiões Administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília**. São Paulo: DAEE, 1979. v.1 e 2.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE: IPT: IG: CPRM, 2005. 3 v. Escala 1:1.000.000

DORANTI-TIRITAN, C. **Evolução geomorfológica e modelagem termocinemática 3D da região do Planalto de Poços de Caldas (SP/MG)**. 2013. 160 p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

DUARTE, C. R. **Radioelementos naturais na área do Projeto Rio Preto (GO)**. 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP – Rio Claro, 2002.

EDWARDS, K.W. Isotopic analysis of uranium in natural waters by alpha spectrometry. **U.S. Geological Survey Water-Supply Paper** 1969-F, 44: 1-26, 1968

ELLERT, R. Contribuição À Geologia Do Maciço Alcalino De Poços De Caldas. São Paulo, Fac, Filos. Ciênc. Let/Usf, **Boletim** 237, 1959, 18: p. 5 – 63.

EBERT, H. Ocorrências da fácies granulíticas no sul de Minas Gerais e em áreas adjacentes, em dependência da estrutura orogênica: hipótese sobre sua origem. **Na. Acad. Bras. Ciên.**, 40 (supl.): 215 – 229, 1968.

FERNANDES, L. A. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP e MG), Escala 1:1.000.000. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 55, p. 53-66, 2004.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatórios do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte I). **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 2, p. 147-191, 1988.

FÚLFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M. V.; VIANNA, R. B. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 590-610, 1982.

GABELMAN, J.W. **Migration of uranium and thorium – exploration significance**. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum. Geology, 1977, 168 p.

HASUI, Y., OLIVEIRA, M.A.F. **Província Mantiqueira** – setor central . In: Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. coords.: *O Pré-Cambriano do Brasil*. 1 ed. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1984. p. 308 – 344.

HASUI, Y. **Sistema Orogênico Mantiqueira**. In: Hasui, Y.; Carneiro C.D. R.; Almeida F. F. M.; Bartorelli, A. (org). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Editora Beca, p. 331-371, 2012.

HEIER, K.S.; BILLINGS, G.K. Potassium. In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.). **Handbook of Geochemistry**. New York: Springer-Verlag, 1969. v.2, cap. 19.

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources**. Vienna: IAEA. Safety Series, 1996. 115, 353 p.

ICRP (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION) **Limits for intakes of radionuclides by workers**. Oxford: Pergamon Press. Annals of the ICRP, 1980, 4 (3/4): 1-71.

ICRP (INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION) **1990 Recommendations of the ICRP**. Oxford: Pergamon Press. Annals of the ICRP 1991, 21: 1-3.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Estimativas de população 2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2015/estimativa_tcu.shtm> Acessado em 15 de Agosto de 2015.

IOS (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **Water quality – measurement of gross alpha activity in non-saline water – thick source method**. Geneva (Draft International Standard 9696), 1990a.

IOS (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **Water quality – measurement of gross beta activity in non-saline water**. Geneva (Draft International Standard 9697), 1990b.

IPT (INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO). Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Monografias, IPT, 1981.

IRITANI, M. A. e EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2012. 104p.: il. Color: 3a edição.

JOBBÁGY, V.; WÄTJEN, U.; MERESOVA, J. Current status of gross alpha/beta activity analysis in water samples: a short overview of methods. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 286, p. 393–399, 2010.

KELLY, J.J. **Effluent and environmental radiation surveillances**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials. ASTM STP 698, pp. 327-341, 1980.

KHANDAKER, M.U., LATIF, S.A., KARIM, A.N.M., UDDIN, N., MURAD, H., JOJO, P.J., Characterization of HPGe-Detector for gamma-ray spectrometry and its application for analyzing natural samples, **Asian Journal Physical Sciences**, 1, p. 47-61, 2012.

KU, T.L.; The uranium – series methods of age determination. **An. Rev. Earth Plan. Sci. Elsevier Science** v. 4 p. 347-79. 1976.

LANGMUR, D.; HERMAN, J.S. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. **Geoch. Cosmc. Acta**, v. 44, p. 1753 – 66. 1980.

LEINZ, V.; BARTORELLI, A.; SADOWSKI, G. R.; ISOTTA, C. A. L. Sobre o comportamento espacial do Trapp basáltico da Bacia do Paraná. **Boletim da SBG**, v. 15, n. 4, p. 79-91, 1966.

MENTE, A; MONTALVERNE, A.F., 1981. Mapa hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000. In: **Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos**, IV, 1981, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABRH, 1981. V.1, p. 597-610.

MENTE, A. J. **Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país. Relatório técnico 015, jun. 2009.** Projeto de assistência técnica ao setor de energia. Mente, Albert. J. Mendo Consultoria. Ministério de Minas e Energia e Banco Mundial. Disponível em:http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256660/P07_RT15_Analise_das_Informacoes_sobre_Recursos_Hidricos_Subterraneos_no_Pais.pdf/59673539-b83b-469b-b874-493991ccbb6e. Acesso em: 15 de junho 2016.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p 265-287, 2007.

MORAIS, S. M.(Org). **Integração Geológica da Folha Campinas SF.23-Y-A, Escala 1:250000 Estados de São Paulo e Minas gerais: nota explicativa. São Paulo: CPRM, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB; Projeto de Integração Geológico-Metalogenética Folha Rio de Janeiro, 1999.**

PEARCE, A.. **Recommended Nuclear Decay Data. NPL REPORT IR 6.** National Physical Laboratory Hampton Road, Teddington, UK, 2008.

PERINOTTO, J. A. J.; ETCHEBEHERE, M. L.; SIMOES, L. S. A.; ZANARDO, A. Diques Clásticos na Formação Corumbataí (P) no Nordeste da Bacia do Paraná, SP: Análise Sistemática e Significações Estratigráficas e Tectônicas . **Geociências**, São Paulo. 2008

PERROTTA, M. M. **A Faixa Alto Rio Grande na região a sul de São Gonçalo do Sapucaí (MG).** 1991. 147 p. Dissertação de Mestrado (Geoquímica e Geotectônica) – IG, USP, São Paulo, 1991.

QUINTAS, M. C. L.; MANTOVANI, M. S. M.; ZALÁN. P. V. Contribuição para o estudo da evolução mecânica da Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 11, p. 48-73, 1997.

RODRIGUES, J. L., KASTNER, G.F., FERREIRA, A.V., Determinação de curvas de eficiência para detector HPGe em diferentes geometrias de contagem. In: INAC-INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2011, p. 11.

ROGERS, J.J.W.; ADAMS, J.A.S. Uranium. In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) **Handbook of Geochemistry**. New York: Springer-Verlag, 1969a. v. 4, cap. 92.

ROGERS, J.J.W.; ADAMS, J.A.S. Thorium. In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) **Handbook of Geochemistry**. New York: Springer-Verlag, 1969b. v. 4, cap. 90.

RUSSO, P.A.; VO, D.T. S/D. **Gamma-ray detectors for nondestructive analysis.**

Disponível em: <http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/panda/1.%20Gamma-ray%20Detectors%20LAUR.pdf>, acesso em 02 de setembro de 2016.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974, v. 1, p. 41-65.

SOARES, P. C. O limite glacial- pós-glacial do Grupo Tubarão no estado de São Paulo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 44 (suplemento), p. 333-342, 1972

SZIKSZAY, M, TEISSEDRE, J. M. Fontes da Estância de Águas da Prata, Estado de São Paulo. **Boletim IG USP**, São Paulo, v. 8: p. 83-96, 1977.

SZIKSZAY M.; TEISSEDRE, J. M. “Águas minerais” no Estado de São Paulo: características físico-químicas e classificação. **Boletim IG USP**, São Paulo. V. 12: p. 11-22, 1981.

SZIKSZAY, M.; SAMPA, M. H. O. Variação de radioatividade nas águas de fontes da estância de Águas da Prata. **Boletim IG USP**, São Paulo, v. 13, p. 25-42, 1982.

THEDESCHI, M. F.; VIEIRA, P. L. N. C. R.; NOMO, T. A. **Projeto fronteiras de Minas Gerais: Folha Caldas/Poços de Caldas, escala 1:100.000.** Universidade Federal de Minas Gerais, 78 p. 2015.

THORNTON, I. **Applied Environmental Geochemistry.** London: Academic Press, 1983. 501 p.

TROUW, R. A. J.; RIBEIRO, A; PACIULLO, F. V. P. **Geologia da Folha Caxambu. Projeto Sul de Minas, Etapa I,** Capítulo 3. COMIG, UFMG, UFRJ, UERJ. p. 120, 2013.

VASCONCELLOS, A. C. B. C. 1988,199 p. **O Grupo Andrelândia na região de a norte de Ouro Fino, MG.** Dissertação (Mestrado em Geociências), IGUSP, São Paulo, 1988.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION), **Guidelines for Drinking Water Quality: Radiological Aspects**, 4th ed. Geneva: WHO, 2011. v. 1, 541 p.

YOSHINAGA, S. **Estudos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos das águas minerais e termais de Águas de Lindóia, SP,** 1990. 120 p. Dissertação (Mestrado) – IG, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1990.

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP).** 1994. 98 p. Tese (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 1994

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J (coords). **Origem e Evolução das Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: Ed. Gávea: R. Redisch Prog. Visual Prod. Gráf. e Editoração: PETROBRÁS, 1990, p. 135-164.

Anexo 1

Dados dos poços e fontes amostradas

Amostra	Nome da Fonte/poço	Cordenada da Fonte/Parque		Município/Distrito	Estado	Unidade/Descrição de Poço
		Longitude	Latitude			
PABT01	7 Bis	45° 03' 20"W	22° 06' 52"S	São Lourenço	MG	Gr. Andrelândia
PABT02	Sulfurosa	46° 03' 20"W	23° 06' 52"S	São Lourenço	MG	Gr. Paraíba do Sul
PABT03	Poço 22	51° 41' 49"W	20° 47' 19"S	Três Lagoas	MS	SG (0-823); BP (823-1240)
PABT04	Alcalina	47° 03' 20"W	24° 06' 52"S	São Lourenço	MG	Gr. Andrelândia Gr. Paraíba do Sul
PABT05	Primavera	48° 03' 20"W	25° 06' 52"S	São Lourenço	MG	
PABT06	Ferruginosa	49° 03' 20"W	26° 06' 52"S	São Lourenço	MG	
PABT07	Vichy	45° 03' 21"W	22° 06' 45"S	São Lourenço	MG	
PABT08	Roxo Rodrigues	45° 17' 33"W	21° 51' 06"S	Cambuquira	MG	Gr. Andrelândia
PABT09	Com. Augusto Ferreira	45° 17' 33"W	21° 51' 06"S	Cambuquira	MG	
PABT10	Fernandes Pinheiro	45° 17' 33"W	21° 51' 06"S	Cambuquira	MG	
PABT11	Souza Lima	45° 17' 33"W	21° 51' 06"S	Cambuquira	MG	
PABT12	Regina Werneck	45° 17' 33"W	21° 51' 06"S	Cambuquira	MG	
PABT13	Da. Leopoldina	21°59'04"W	44°56'20"S	Caxambu	MG	Gr. Andrelândia
PABT14	Número 6	49° 03' 20"W	26° 06' 52"S	São Lourenço	MG	Gr. Andrelândia Gr. Paraíba do Sul
PABT15	Da. Isabel/Conde Deu	21°59'04"W	44°56'20"S	Caxambu	MG	Gr. Andrelândia
PABT16	Ernestina Guedes	21°59'04"W	44°56'20"S	Caxambu	MG	
PABT17	D Pedro II	21°59'04"W	44°56'20"S	Caxambu	MG	
PABT18	Viotti	21°59'04"W	44°56'20"S	Caxambu	MG	
PABT19	Poço 21	20° 46' 42"W	51° 41' 46"S	Três Lagoas	MS	BA (0-86)
PABT20	Mayrink	21°59'04"W	44°56'20"S	Caxambu	MG	Gr. Andrelândia
PABT21	Duque de Saxe	21°59'04"W	44°56'20"S	Caxambu	MG	
PABT22	Poço 4 (LA4)	21°58'08"W	45°20'55"S	Lambari	MG	Gr. Andrelândia Gr. Barbacena
PABT23	Poço 2 (LA2)	21°58'08"W	45°20'55"S	Lambari	MG	
PABT24	Poço 1 (LA1)	21°58'08"W	45°20'55"S	Lambari	MG	
PABT25	Poço 3 (LA3)	21°58'08"W	45°20'55"S	Lambari	MG	
PABT26	Ademar de Barros	21°06'17"W	49°10'46"S	Termas de Ibirá	SP	Gr. Bauru e Fm. Serra Geral
PABT27	Carlos Gomes	21°06'17"W	49°10'46"S	Termas de Ibirá	SP	
PABT28	Saracura	21°06'17"W	49°10'46"S	Termas de Ibirá	SP	
PABT29	Seixas	21°06'17"W	49°10'46"S	Termas de Ibirá	SP	
PABT30	São Jorge	22°36'60"W	46°41'49"S	Lindóia	SP	Complexo Amparo
PABT31	Samaritana	21°55'60"W	46°25'60"S	Pocinhos do Rio Verde	MG	Complexo Intrusivo Alcalino de Poços de Caldas
PABT32	Amorosa	21°55'60"W	46°25'60"S	Pocinhos do Rio Verde	MG	
PABT33	Italianos	22°36'21"W	46°42'18"S	Serra Negra	SP	Complexo Amparo
PABT34	São Carlos	22°36'21"W	46°42'18"S	Serra Negra	SP	
PABT35	Santa Luzia	22°36'21"W	46°42'18"S	Serra Negra	SP	
PABT36	Santo Agostinho	22°36'21"W	46°42'18"S	Serra Negra	SP	
PABT37	Brunhara	22°36'21"W	46°42'18"S	Serra Negra	SP	
PABT38	Laudo Natel	22°36'21"W	46°42'18"S	Serra Negra	SP	
PABT39	Curie	22°28'31"W	46°37'31"S	Águas de Lindóia	SP	Complexo Amparo; Gr. Andrelândia
PABT40	Sant'ana	22°36'21"W	46°42'18"S	Serra Negra	SP	Complexo Amparo
PABT41	Bioleve	22°31'25"W	46°38'24"S	Lindóia	SP	Complexo Amparo
PABT42	São Benedito	22°31'25"W	46°38'24"S	Lindóia	SP	
PABT43	Poço 15	49° 56' 55"W	21° 08' 39"S	Araçatuba	SP	BA (0-110)
PABT44	Poço 40	49° 56' 55"W	20° 25' 11"S	Votuporanga	SP	BA (0-92); SG (92-105)
PABT45	Poço 74	55° 15' 21"W	23° 03' 50"S	Amambai	MS	M/SG (0-40); BP (40-150)
PABT46	Poço60	49° 14' 25"W	22° 53' 08"S	Águas de Santa Bárbara	SP	SG (0-110)

PABT47	Poço 62	49°14' 40"W	22° 53' 42"S	Águas de Santa Bárbara	SP	SG(0-109); BO (109-128); SG (128-172); BO(172-240); PI (240-293); SG (293-299)
PABT48	Poço 61	49° 14' 08"W	22° 52' 51"S	Águas de Santa Bárbara	SP	SG+BP (0-100)
PABT49	Poço 18	50° 26' 21"W	21° 12' 40"S	Araçatuba	SP	BP (944-969)
PABT50	Poço 57	48° 58' 18"W	23° 13' 02"S	Avaré	SP	M (0-8); BA (8-12); SG (12-35); BP (35-150)
PABT51	Poço 55	48° 56' 27"W	23° 05' 57"S	Avaré	SP	BA+SG (0-92)
PABT52	Poço 54	48° 56' 27"W	23° 05' 57"S	Avaré	SP	BA (0-27); SG (27-101)
PABT53	Poço 58	48° 55' 51"W	23° 06' 03"S	Avaré	SP	SG (0-204); BP (204-426); PD (426-430)
PABT54	Poço 56	48° 54' 33"W	23° 06' 46"S	Avaré	SP	M (0-10); BP (10-100)
PABT55	Poço 64	49° 29' 01"W	23° 00' 31"S	Bernardino de Campos	SP	SG (0-102)
PABT56	Poço 65	49° 29' 05"W	23° 01' 41"S	Bernardino de Campos	SP	M (0-21); SG (21-327); BO (327-402); PI (402-509)
PABT57	Beleza			Águas de Lindoia	MG	Complexo Amparo; Gr. Andrelândia
PABT58	Poço 67	49° 34' 15"W	22° 43' 00"S	Santa Cruz do Rio Pardo	SP	SG (0-102)
PABT59	Poço 28	48° 30' 06"W	21° 24' 00"S	Taquaritinga	SP	BA (0-92)
PABT60	Poço 41	49° 56' 51"W	20° 25' 50"S	Votuporanga	SP	BA (0-72); SG (72-130)
PABT61	Poço 3	48° 19' 05"W	21° 14' 22"S	Jaboticabal	SP	BA (0-72); SG (72-120)
PABT62	Poço 4	48° 18' 36"W	21° 13' 59"S	Jaboticabal	SP	BA (0-40); SG (40-206)
PABT63	Poço 79	52° 08' 23"W	21° 47' 18"S	Presidente Epitácio	SP	BA (0-70)
PABT64	Frayha	46° 33' 52"W	21° 33' 52"S	Poços de Caldas	MG	Complexo Intrusivo Alcalino de Poços de Caldas
PABT65	Poço 29	48° 30' 35"W	21° 23' 58"S	Taquaritinga	SP	BA (0-102); SG (102-408); BO (408-655); SG (655-658)
PABT66	Macacos	46° 33' 52"W	21° 33' 52"S	Poços de Caldas	MG	Complexo Intrusivo Alcalino de Poços de Caldas
PABT67	Poço 11	48° 26' 41"W	21° 12' 44"S	Monte Alto	SP	BA (0-136); SG (136-140)
PABT68	Poço 13	48° 30' 00"W	21° 15' 13"S	Monte Alto	SP	BA (0-55); SG (55-464); BO (464-581)
PABT69	Poço 12	48° 38' 28"W	21° 14' 04"S	Monte Alto	SP	BA (0-74); SG (74-90); BA (90-117); SG (117-145)
PABT70	Poço 38	49° 58' 31"W	20° 25' 28"S	Votuporanga	SP	BA (0-120)
PABT71	Poço 23	48° 23' 31"W	21° 27' 50"S	Santa Ernestina	SP	BA (0-75); SG (75-117)
PABT72	Poço 39	49° 58' 31"W	20° 25' 28"S	Votuporanga	SP	BA (0-90)

PABT73	Poço 24	48° 23' 30"W	21° 27' 54"S	Santa Ernestina	SP	BA (0-72); SG (72-108)
PABT74	Poço 25	48° 23' 12"W	21° 27' 57"S	Santa Ernestina	SP	BA (0-19); SG (19-176); BO (176-200)
PABT75	Poço 26	48° 23' 14"W	21° 27' 40"S	Santa Ernestina	SP	BA (0-14); SG (14-164); BO (164-216); SG (216-234)
PABT76	Poço 74	51° 26' 14"W	22° 05' 52"S	Presidente Prudente	SP	BA (0-231)
PABT77	Poço 75	51° 26' 41"W	22° 07' 13"S	Presidente Prudente	SP	BA (0-236); SG (236-241)
PABT78	Poço 76	51° 26' 17"W	22° 07' 51"S	Presidente Prudente	SP	BA (0-256); SG (256-272)
PABT79	Poço 80	52° 05' 27"W	21° 46' 29"S	Presidente Epitácio	SP	BA (0-90); SG (90-1,623); BO (1,623-1976)
PABT80	Poço 53	50° 31' 57"W	20° 17' 15"S	Jales	SP	BA (0-85); SG (85-986); BP (986-1205)
PABT81	Poço 73	50° 33' 38"W	22° 25' 21"S	Paraguaçu Paulista	SP	BA (0-64); SG(64-974); BO (974-1,250); PD (1,250-2,050); TU (2,050-3,554); PA (3,554-3,663)
PABT82	Poço 77	51° 22' 43"W	22° 06' 45"S	Presidente Prudente	SP	BA (0-218); SG (218-1,440); BO (1,440-1,570); PI (1,570-1,730); PD (1,730-1,800)
PABT83	Poço 44	50° 05' 07"W	20° 25' 12"S	Fernandópolis	SP	BA (0-92); SG (92-95)
PABT84	Poço 45	50° 05' 07"W	21° 25' 12"S	Fernandópolis	SP	BA (0-136); SG (136-136)
PABT85	Poço 47	50° 05' 07"W	20° 25' 12"S	Fernandópolis	SP	BA (0-31); SG (31-390)
PABT86	Poço 46	50° 05' 07"W	20° 25' 12"S	Fernandópolis	SP	BA (0-12); SG (12-309)
PABT87	Poço 71	50° 34' 20"W	22° 24' 46"S	Paraguaçu Paulista	SP	BA (0-90)
PABT88	Poço 50	30° 33' 18"W	20° 16' 56"S	Jales	SP	BA (0-96); SG (96-102)
PABT89	Poço 51	50° 33' 11"W	20° 16' 11"S	Jales	SP	M (0-2); BA (2-100.5); SG (100.5-101)
PABT90	XV de Novembro	46° 33' 52"W	21° 33' 52"S	Poços de Caldas	MG	Complexo Intrusivo Alcalino de Poços de
PABT91	Quisisana	46° 33' 52"W	21° 33' 53"S	Poços de Caldas	MG	
PABT92	Poço 78	52° 08' 23"W	21° 47' 18"S	Presidente Epitácio	SP	BA (0-80)
PABT93	São Roque	46°37'31"W	22°28'31"S	Águas de Lindóia	SP	Gr. Amparo
PABT94	Poço 72	50° 37' 47"W	22° 21' 26"S	Paraguaçu Paulista	SP	BA (0-72)
PABT95	Poço 27	48° 30' 14 "W	21° 24' 16"S	Taquaritinga	SP	BA (0-75)
PABT96	Poço 69	49° 39' 05"W	22° 54' 56"S	Santa Cruz do Rio Pardo	SP	SG (0-114); BO (114-124)
PABT97	Poço 66	49° 37' 13"W	22° 54' 13"S	Santa Cruz do Rio Pardo	SP	SG (0-196); BO (196-198)
PABT98	Poço 77	54° 58' 07"W	20° 56' 09"S	Sidrolândia	MS	M/SG (0-77); BO (77-95)
PABT99	Poço 16	47° 53' 38"W	22° 00' 00"S	São Carlos	SP	M (0-5); SG (5-90); BO (90-130)

PABT100	Poço 68	49° 32' 40"W	22° 57' 57"S	Santa Cruz do Rio Pardo	SP	M (0-6); SG (6-100)
PABT101	Poço 33	47° 54' 33"W	22° 32' 07"S	São Pedro	SP	BP (0-150)
PABT102	Poço 70	49° 29' 05"W	23° 16' 03"S	Sarutaiá	SP	M (0-4); SG (4-26); BO (26-145); DI (145-152)
PABT103	Poço 2	47° 59' 05"W	21° 07' 36"S	Sertãozinho	SP	M (0-6); SG (6-136); BO (136-186); PI (186-353)
PABT104	Villela	46° 42' 33"W	21° 55' 45"S	Águas da Prata	SP	Fm. Botucatu ; Fm. Serra Geral;
PABT105	Vitória	46° 42' 55"W	21° 56' 31"S	Águas da Prata	SP	
PABT106	Poço 36	49° 30' 50"W	20° 48' 40"S	Mirassol	SP	BA (0-170)
PABT107	Poço 43	49° 58' 26"W	20° 23' 58"S	Votuporanga	SP	BA (0-93); SG (93-1180); PI (1180-1421)
PABT108	Poço 42	49° 58' 27"W	20° 24' 52"S	Votuporanga	SP	BA (0-143); SG (143-1188); BO (1188-1296); P(1296-1345); PD (1345-1352)

Anexo 1: Código e localização dos poços/fontes das amostras de água. Dados geológicos com base em Beato (1999), CPRM (2010) e Trouw (2013); M manto de alteração, DI soleira de diabásio, BA Grupo Bauru, SG Formação Serra Geral, BO Formação Botucatu, PI Formação Pirambóia, BP não diferenciado (Fm. Botucatu e Pirambóia), PD Grupo Passa Dois, TU Grupo Tubarão, PA Grupo Paraná (Devoniano). Em parênteses o intervalo de profundidade (metros).

Anexo 2

Cálculo de separação do ^{226}Ra

Padrão	Contagem Total (226Ra + 235U)
NBL-101-A	39,77321318
NBL-102-A	4,003993723
NBL-103-A	2,047051738
NBL-104-A	0,527663344
NBL-105-A	0,039934754
NBL-106-A	9,729125848
NBL-107-A	1,053279779

Eficiência de detecção do ^{226}Ra e ^{235}U = 7,67% (segundo a curva de eficiência obtida)

Intensidade pico ^{226}Ra : 3,505%

Intensidade pico ^{235}U : 57,25%

Lembrando que: contagem/atividade ^{238}U = ^{226}Ra no equilíbrio.

Cálculo das atividades do ^{235}U e ^{238}U :

Padrão	Contagem	U ppm	235U ppm	massa g	% 235U	235U (g)	Atividade 235U (Bq)
NBL-101-A	39,77321318	10000	72,04	50	0,007204	0,003602	288,01592
NBL-102-A	4,003993723	1000	7,204	50	0,0007204	0,0003602	28,801592
NBL-103-A	2,047051738	500	3,602	50	0,0003602	0,0001801	14,400796
NBL-104-A	0,527663344	100	0,7204	48,96	0,00007204	3,52708E-05	2,820251889
NBL-105-A	0,039934754	10	0,07204	50	0,000007204	0,000003602	0,28801592
NBL-106-A	9,729125848	400	2,8816	50	0,00028816	0,00014408	11,5206368
NBL-107-A	1,053279779	40	0,28816	50	0,000028816	0,000014408	1,15206368

$$\frac{\text{Contagem}_{235\text{U}}}{\text{Contagem}_{238\text{U}}} = \frac{\text{Ef}(\%) * A_{235\text{U}} * f(\%)_{235\text{U}}}{\text{Ef}(\%) * A_{238\text{U}} * f(\%)_{238\text{U}}} = 0,7620$$

então,

$$\text{Contagem}_{226\text{Ra}} = \text{Contagem total} / (1 + 0,7620)$$

A fórmula obtida foi aplicada nos picos de todas as amostras para a obtenção da contagem referente ao ^{226}Ra e posterior cálculo da atividade alfa.

Padrão	Contagem	U ppm	238U ppm	massa g	% 228U	238U (g)	Atividade 238U (Bq)
NBL-101-A	39,77321318	10000	9927,42	50	0,992742	0,496371	6173,366127
NBL-102-A	4,003993723	1000	992,742	50	0,0992742	0,0496371	617,3366127
NBL-103-A	2,047051738	500	496,371	50	0,0496371	0,02481855	308,6683064
NBL-104-A	0,527663344	100	99,2742	48,96	0,00992742	0,004860465	60,44960112
NBL-105-A	0,039934754	10	9,92742	50	0,000992742	0,000496371	6,173366127
NBL-106-A	9,729125848	400	397,0968	50	0,03970968	0,01985484	246,9346451
NBL-107-A	1,053279779	40	39,70968	50	0,003970968	0,001985484	24,69346451

Anexo 3

Cálculo de separação do ^{224}Ra

Amostra	CpsBG	Contagem Total obtida	Cálculo da concentração de Th na amostra com base no pico do 208Tl e utilização da curva de calibração em concentração					Cálculo da concentração de 238U e 235U com base no pico do 226Ra e a razão isotópica natural do urânio					Cálculo das contagens teóricas dos picos 214Ra, 212Pb, 227Th e 214Pb através da fórmula apresentada no anexo 2. A somatória representa a contagem total com a contribuição teórica do 224Ra (%)					Contagem (cps, referente ao 224Ra conforme a % calculada			
			Cps 208Tl	Cps/g 208Tl	log(cps/g 208Tl)	log (Th ppm)	Th (ppm)	Cps 226Ra	cps/g 226Ra	log (cps/g 226Ra)	log (U ppm)	238U (ppm)	235U (ppm)	Cps 224Ra	Cps 212Pb	Cps 227Th	Cps 214Pb		CPS TOTAL	% do 224Ra	
PABT01	0,084532305	0,052454236	0,020325543	2,03255E-05	-4,691957837	-0,488056183	0,325045245	0,004468044	4,46804E-06	-5,349882524	-1,290658844	0,051208394	0,000371582	0,003231105	0,034123623	0,000218399	0,0028279	0,040401027	7,997581747	0,00419507	
PABT02	0,084532305	0,054682121	0,020575981	2,0576E-05	-4,686639445	-0,482478786	0,329246536	0,006761595	6,76159E-06	-5,169950862	-1,120407506	0,075786612	0,000549928	0,003272868	0,034564679	0,000323223	0,004185192	0,042345962	7,728878616	0,004226315	
PABT03	0,084532305	0,059968682	0,014907315	1,49073E-05	-4,826600572	-0,629256019	0,23482481	0,000897656	8,97656E-07	-6,046889983	-1,950167302	0,011215863	8,13854E-05	0,002334271	0,024652178	4,78347E-05	0,000619378	0,027653661	8,441091671	0,005062011	
PABT04	0,084532305	0,041932722	0,010348457	1,03485E-05	-4,985124382	-0,795499939	0,160140087	0,005672951	5,67295E-06	-5,246190948	-1,192545875	0,064188042	0,000465766	0,001591869	0,01681169	0,000273756	0,00354468	0,022221995	7,163483917	0,003003844	
PABT05	0,084532305	0,033272736	0,008190991	8,19099E-06	-5,091027823	-0,906560878	0,124004979	0,005235097	5,2351E-06	-5,281075299	-1,22553448	0,059490354	0,000431678	0,001232669	0,013018185	0,000253721	0,003285257	0,017789832	6,929063544	0,002305489	
PABT06	0,084532305	0,02737981	0,00460674	4,60674E-06	-5,336606258	-1,164098983	0,068533201	0	0	0	0	0	0	0,000681253	0,007194694	0	0	0,007875947	8,64978903	0,002368296	
PABT07	0,084532305	0,079320144	0,023720803	2,37208E-05	-4,624870614	-0,417701813	0,382206604	0,004025657	4,02566E-06	-5,395163205	-1,333503425	0,046397713	0,000336675	0,003799316	0,040124488	0,000197882	0,002562238	0,046683924	8,138382684	0,006455377	
PABT08	0,084532305	0,066773945	0,02319453	2,71156E-05	-4,566780097	-0,356782288	0,439762013	0	0	0	0	0	0	0,003759442	0,03970338	0	0	0,043462822	8,64978903	0,005775805	
PABT09	0,084532305	0,078775692	0,020066239	2,15766E-05	-4,666016964	-0,46085199	0,346057296	0	0	0	0	0	0	0,003199177	0,033786428	0	0	0,036985605	8,64978903	0,006813931	
PABT10	0,084532305	0,081979846	0,016852727	1,68527E-05	-4,773329822	-0,573390984	0,267060105	0	0	0	0	0	0	0,002654705	0,011720201	0	0	0,030690982	8,64978903	0,007091084	
PABT11	0,084532305	0,117545956	0,02979418	3,42462E-05	-4,465387816	-0,250452202	0,561756101	0	0	0	0	0	0	0,004858188	0,051307206	0	0	0,056165394	8,64978903	0,010167477	
PABT12	0,084532305	0,063580931	0,015949549	1,59495E-05	-4,797251592	-0,598477745	0,252070635	0	0	0	0	0	0	0,002505703	0,026462665	0	0	0,028968367	8,64978903	0,005499616	
PABT13	0,084532305	0,095170517	0,015701916	1,57019E-05	-4,804047341	-0,605604447	0,247967951	0	0	0	0	0	0	0,00246492	0,02603196	0	0	0,02849688	8,64978903	0,008232049	
PABT14	0,084532305	0,050700298	0,018949599	2,78671E-05	-4,554908889	-0,344332952	0,452550499	0	0	0	0	0	0	0,003059026	0,032306304	0	0	0,035365331	8,64978903	0,004385469	
PABT15	0,084532305	0,036572592	0,007260637	9,0758E-06	-5,042115238	-0,85526625	0,139551256	0	0	0	0	0	0	0,001109765	0,011720201	0	0	0,012829966	8,64978903	0,003163452	
PABT16	0,084532305	0,125055325	0,032618842	6,52377E-05	-4,185501469	0,04306461	1,104242885	0	0	0	0	0	0	0,005488351	0,057962343	0	0	0,063450694	8,64978903	0,010817022	
PABT17	0,084532305	0,152481514	0,041318943	6,16701E-05	-4,209925602	0,017451021	1,041006699	0	0	0	0	0	0	0,00693319	0,07322125	0	0	0,08015444	8,64978903	0,013189329	
PABT18	0,084532305	0,098759368	0,017663181	2,15405E-05	-4,666744921	-0,461615399	0,345449526	0,003894679	4,74961E-06	-5,323342137	-1,26554633	0,054256737	0,000393702	0,002815825	0,029737864	0,000189748	0,002456916	0,035200354	7,999423693	0,00790018	
PABT19	0,084532305	0,092348622	0,016050563	1,60506E-05	-4,794509743	-0,595602367	0,253745081	0	0	0	0	0	0	0,002522347	0,02663845	0	0	0,029160797	8,64978903	0,007987961	
PABT20	0,084532305	0,133669121	0,033947444	4,13993E-05	-4,383006777	-0,164059207	0,685394781	0,006512995	7,94268E-06	-5,100033078	-1,054251299	0,088256907	0,000640416	0,00558678	0,059001895	0,000308654	0,003996552	0,068893886	8,109260318	0,010839571	
PABT21	0,084532305	0,129855606	0,037766635	5,24537E-05	-4,280224204	-0,056271122	0,87847393	0,005692651	7,90646E-06	-5,102017927	-1,056129362	0,087876072	0,000637653	0,006287365	0,066400705	0,000269844	0,003494025	0,076451939	8,223944057	0,010679252	
PABT22	0,084532305	0,23919767	0,064165466	8,91187E-05	-4,050031141	0,185132343	1,531554102	0,007823854	1,08665E-05	-4,963911782	-0,925453328	0,118726228	0,00086151	0,010961554	0,115764702	0,000364577	0,004720652	0,131811485	8,316083955	0,019891879	
PABT23	0,084532305	0,055135127	0,012283404	1,39584E-05	-4,855163928	-0,659210411	0,21917428	0,003387908	3,8499E-06	-5,414551006	-1,351848162	0,044478675	0,000322749	0,001917253	0,020248067	0,000166934	0,002161511	0,024493765	7,827516369	0,004315711	
PABT24	0,084532305	0,012967228	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PABT25	0,084532305	0,039547613	0,00220229	2,39379E-06	-5,620913379	-1,46225186	0,034494364	0,005024629	5,46155E-06	-5,262683836	-1,208151446	0,06192251	0,000449327	0,000315459	0,003331557	0,000242966	0,003146004	0,007035987	4,483510888	0,001773122	
PABT26	0,084532305	0,03338633	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PABT27	0,084532305	0,090085844	0,00987084	9,87084E-06	-5,005645872	-0,817020826	0,152397967	0,002749766	2,74977E-06	-5,560704255	-1,490138366	0,032349058	0,000234734	0,001514909	0,015998914	0,000137966	0,001786424	0,019438212	7,793456942	0,007020801	
PABT28	0,084532305	0,087306294	0,015179201	1,76502E-05	-4,75324953	-0,552332782	0,280328477	0	0	0	0	0	0	0,002396475	0,025309117	0	0	0,027705592	8,64978903	0,00755181	
PABT29	0,084532305	0,161651228	0,03707937	7,27046E-05	-4,138437831	0,092420247	1,237143983	0	0	0	0	0	0	0,006271879	0,066237166	0	0	0,072509045	8,64978903	0,01398249	
PABT30	0,084532305	0,147523688	0,038107615	4,53662E-05	-4,343267514	-0,122384642	0,754423761	0,002944475	3,50533E-06	-5,455271435	-1,390377832	0,040702602	0,000295349	0,00629944	0,066528229	0,000145818	0,001888097	0,074861584	8,414782819	0,012413798	
PABT31	0,084532305	0,079237759	0,016338235	1,63382E-05	-4,786794849	-0,587511758	0,258516485	0,006556371	6,55637E-06	-5,183336454	-1,133072953	0,073608344	0,000534122	0,002569777	0,027139357	0,000313993	0,0040649	0,034087968	7,538664271	0,005973469	
PABT32	0,084532305	0,053904568	0,011926443	1,19264E-05	-4,923489066	-0,730862983	0,185839067	0,003495158	3,49516E-06	-5,456553189	-1,391571704	0,040590864	0,000294538	0,001847329	0,019509599	0,000173116	0,002241564	0,023771608	7,77115782	0,004189009	
PABT33	0,084532305	0,079638311	0,01476639	1,47664E-05	-4,830725665	-0,633582005	0,232497343	0,000840981	8,40981E-07	-6,075213558	-1,976967069	0,010544669	7,6515E-05	0,002311135	0,024407838	4,49721E-05	0,000582312	0,027346257	8,451375201	0,006730532	
PABT34	0,084532305	0,042865797	0,005876883	5,87688E-06	-5,230852932	-1,05319547	0,088471732	0,002577541	2,57754E-06	-5,588794457	-1,516717316	0,03042865	0,000220799	0,000879451	0,009287864	0,000129775	0,001680372	0,011977463	7,342550822	0,003147443	
PABT35	0,084532305	0,070537804	0,012385063	1,23851E-05	-4,907101782	-0,713677639	0,193340288	0	0	0	0	0	0	0,001921895	0,020297085	0	0	0,02221898	8,64978903	0,006101371	
PABT36	0,084532305	0,055023704	0,010546616	1,05466E-05	-4,976886858	-0,786861248	0,163357377	0,005668999	5,669E-06	-5,246493634	-1,192832276	0,064145726	0,000465459	0,00162385	0,017149445	0,000273576	0,003542343	0,022589214	7,188609774	0,003955439	
PABT37	0,084532305	0,05597691	0,010559449	0,05594E-05	-4,976307434	-0,786307434	0,163565824	0	0	0	0	0	0	0,001625923	0,017171328	0	0	0,01879725	8,64978903	0,004807285	
PABT38	0,084532305	0,190001387	0,048324292	4,83243E-05	-4,3158345	-0,09361564	0,806091534	0,005664359	5,66436E-06	-5,246849236	-1,193168747	0,064096048	0,000465098	0,008012935	0,084624415	0,000273364	0,003539599	0,096450313	8,307837536	0,015785007	
PABT39	0,084532305	0,132646611	0,028623413	2,86234E-05	-4,543278587	-0,332136254	0,465440045	0	0	0	0	0	0	0,004626697	0,04886243	0	0	0,053489127	8,64978903	0,011473652	
PABT40	0,084532305	0,06827507	0,015381885	1,53819E-05	-4,812990453	-0,614983088	0,242670459	0,002331903	2,3319E-06	-5,632289506	-1,557872331	0,027677552	0,000200836	0,00241226	0,025475823	0,000118042	0,001528448	0,029534574	8,167581643	0,005576422	
PABT41	0,084532305	0,050553852	0,009097082	9,09708E-06	-5,041097907	-0,854199375	0,139894495	0,000572587	5,72587E-07	-6,242158414	-2,134930291	0,007329422	5,31843E-05	0,001390618	0,014686285	3,12593E-05	0,000404755	0,016512918	8,421396028	0	

PABT51	0,084532305	0,062419363	0,007996649	8,88517E-06	-5,051334498	-0,864934488	0,1364789	3,83809E-05	4,26454E-08	-7,37012748	-3,202214622	0,000627748	4,55511E-06	0,001220999	0,01289494	2,40956E-06	3,11997E-05	0,014149549	8,62942327	0,005386319
PABT52	0,084532305	0,08470283	0,019126992	2,12522E-05	-4,67259583	-0,467751247	0,340603223	0,002733986	3,03776E-06	-5,517446145	-1,449207543	0,035546141	0,000257933	0,003047183	0,032181226	0,000136441	0,00176668	0,037131529	8,206457086	0,006951101
PABT53	0,084532305	0,060027024	0,014230386	2,37173E-05	-4,624934566	-0,41776888	0,382147586	0,003118427	5,19738E-06	-5,284215663	-1,22852486	0,059084714	0,000428735	0,002279238	0,024070975	0,000151195	0,001957714	0,028459122	8,008812998	0,004807452
PABT54	0,084532305	0,030611051	0,005347079	5,34708E-06	-5,27188338	-1,0962241	0,08012645	0,002563145	2,56315E-06	-5,591226807	-1,519018805	0,030267824	0,000219632	0,000796495	0,008411767	0,00012909	0,001671491	0,011008843	7,235049689	0,002214725
PABT55	0,084532305	0,060520621	0,010901793	1,5574E-05	-4,807600122	-0,609330248	0,24584974	0,002868105	4,09729E-06	-5,387502952	-1,326255293	0,047178563	0,000342341	0,001710705	0,018066712	0,000140849	0,001823751	0,021742016	7,868197533	0,004761882
PABT56	0,084532305	0,043705829	0,00637469	6,37469E-06	-5,195540958	-1,016163803	0,096346556	0,002004605	2,0046E-06	-5,69797127	-1,620020415	0,023987202	0,000174058	0,000957731	0,010114572	0,000102303	0,001324654	0,01249926	7,662300248	0,003348872
PABT57	0,084532305	0,037932082	0,005801056	5,80106E-06	-5,236492956	-1,059110163	0,087274996	0	0	0	0	0	0	0,000867555	0,009162229	0	0	0,010029784	8,64978903	0,003281045
PABT58	0,084532305	0,066821096	0,014951266	1,49513E-05	-4,825322035	-0,627915218	0,235550908	0,002428179	2,42818E-06	-5,614719289	-1,541247392	0,028757598	0,000208673	0,002341489	0,024728405	0,000122649	0,001588091	0,028780633	8,135639838	0,005436324
PABT59	0,084532305	0,03980559	0,017239023	1,7239E-05	-4,763487343	-0,563069177	0,273483307	0	0	0	0	0	0	0,002718555	0,028710592	0	0	0,031429146	8,64978903	0,008113986
PABT60	0,084532305	0,0881456	0,018141491	1,81415E-05	-4,741327029	-0,539829656	0,288516294	0	0	0	0	0	0	0,00286799	0,030288772	0	0	0,033156762	8,64978903	0,007624408
PABT61	0,084532305	0,029346921	0,003991915	3,99192E-06	-5,398818668	-1,229341137	0,058973766	0,002407836	2,40784E-06	-5,618373035	-1,544704566	0,028529584	0,000207018	0,000586227	0,006191134	0,000121676	0,0015755	0,008474537	6,917515946	0,002030078
PABT62	0,084532305	0,049575578	0,007686583	7,68658E-06	-5,114266684	-0,930931471	0,117238034	0,005189109	5,18911E-06	-5,284907209	-1,229179201	0,05899576	0,000428089	0,001165402	0,012307783	0,000251612	0,003257944	0,016982742	8,862273215	0,003402012
PABT63	0,084532305	0,096618728	0,021590034	2,159E-05	-4,665746665	-0,460568527	0,34628324	0	0	0	0	0	0	0,003442221	0,036353212	0	0	0,039795433	8,64978903	0,008357316
PABT64	0,084532305	0,25187796	0,065647142	6,56471E-05	-4,182784176	0,045914235	1,111512203	0	0	0	0	0	0	0,011048963	0,116687827	0	0	0,12773679	8,64978903	0,021786912
PABT65	0,084532305	0,082885635	0,016074763	1,60748E-05	-4,793855413	-0,594916172	0,254146322	0	0	0	0	0	0	0,002526336	0,026680573	0	0	0,029206909	8,64978903	0,007169433
PABT66	0,084532305	0,083653483	0,020487398	2,04874E-05	-4,688513196	-0,484443788	0,327760197	0,002602407	2,60241E-06	-5,584624779	-1,512771966	0,030706339	0,000222814	0,003258093	0,034408642	0,00013096	0,001695707	0,039493402	8,249714979	0,006901174
PABT67	0,084532305	0,026176421	0,003298891	3,29889E-06	-5,481632075	-1,316187557	0,048285023	0,000931668	9,31668E-07	-6,030738843	-1,934885093	0,01161756	8,43002E-05	0,000479976	0,005069017	4,95479E-05	0,000641561	0,006240102	7,691800925	0,002013438
PABT68	0,084532305	0,039877682	0,009314822	9,31482E-06	-5,030825438	-0,843426637	0,143407995	0,001889155	1,88916E-06	-5,723732374	-1,644395572	0,002267983	0,000164558	0,001425544	0,015055136	9,67196E-05	0,001252355	0,017829754	7,995309647	0,003188344
PABT69	0,084532305	0,045219976	0,008178233	8,17823E-06	-5,087340499	-0,902693981	0,125114032	0,005472003	5,472E-06	-5,261853672	-1,207365945	0,06203461	0,00045014	0,001243693	0,013134615	0,000264572	0,00342576	0,01806864	6,883159496	0,003112563
PABT70	0,084532305	0,032014065	0,005378603	5,3786E-06	-5,269330472	-1,093546866	0,08062192	0,003861883	3,86188E-06	-5,413200935	-1,350570725	0,044609697	0,0003237	0,00080142	0,008463782	0,000190256	0,002463498	0,011918956	6,723914669	0,002152598
PABT71	0,084532305	0,050499092	0,011428432	1,14284E-05	-4,942013336	-0,750289385	0,177709488	0	0	0	0	0	0	0,001766517	0,018656146	0	0	0,020422663	8,64978903	0,004368065
PABT72	0,084532305	0,051351841	0,013194198	1,34635E-05	-4,870843082	-0,675653141	0,211031293	0,004406411	4,49634E-06	-5,347141058	-1,288064869	0,051515169	0,000373808	0,002055797	0,021711221	0,000215313	0,002787944	0,026770276	7,679401388	0,003943514
PABT73	0,084532305	0,045250526	0,006653966	6,78976E-06	-5,168145498	-0,987434184	0,102935651	0,004879904	4,97949E-06	-5,302814778	-1,246123343	0,056738344	0,000411709	0,001002765	0,010590177	0,000237144	0,003070617	0,014900703	6,729649102	0,003045202
PABT74	0,084532305	0,047444241	0,009490127	9,49013E-06	-5,02277993	-0,834934846	0,146239655	0,00343175	3,43175E-06	-5,464484336	-1,399059078	0,039893755	0,00028948	0,001453692	0,015352407	0,000170143	0,002203067	0,01917931	7,579480848	0,003596027
PABT75	0,084532305	0,032869656	0,0051911	5,1911E-06	-5,28474057	-1,109707436	0,077677022	0,001388072	1,38807E-06	-5,857588103	-1,771049863	0,016941433	0,000122932	0,000772147	0,008154623	7,22537E-05	0,000935563	0,009934586	7,772308987	0,002554731
PABT76	0,084532305	0,036808597	0,005344436	5,34444E-06	-5,272098086	-1,096449263	0,080084918	0,002234172	2,23417E-06	-5,650883451	-1,575465921	0,026578721	0,000192862	0,000796082	0,008407407	0,000113356	0,001467766	0,010784611	7,381651148	0,002717082
PABT77	0,084532305	0,058162531	0,008645009	8,64501E-06	-5,063234545	-0,877414067	0,132612949	0,003732323	3,73232E-06	-5,428020787	-1,364593269	0,04319234	0,000313415	0,001318236	0,01392186	0,000184211	0,002385226	0,017809534	7,401856571	0,004305107
PABT78	0,084532305	0,052242725	0,012931606	1,29316E-05	-4,888347522	-0,694010047	0,202297238	0,003007863	3,00786E-06	-5,521742007	-1,453272287	0,035215002	0,00025553	0,002010931	0,021237396	0,000150189	0,001944691	0,025343207	7,934793984	0,004145353
PABT79	0,084532305	0,080375618	0,018158439	1,81584E-05	-4,740921498	-0,539404375	0,28879896	0,005775897	5,7759E-06	-5,238380596	-1,18515572	0,065289641	0,00047376	0,0028708	0,030318446	0,000278455	0,003605514	0,037073214	7,743595549	0,006223963
PABT80	0,084532305	0,113693768	0,029468816	2,94688E-05	-4,530637307	-0,318879344	0,479866747	0,006621191	6,62119E-06	-5,179063878	-1,129030242	0,07429674	0,000539118	0,004770105	0,050376962	0,000316869	0,004102916	0,059566852	8,007985642	0,009104581
PABT81	0,084532305	0,062431111	0,013454225	1,34542E-05	-4,87114131	-0,675965892	0,210879376	0,003715349	3,71535E-06	-5,430000328	-1,366466311	0,043006459	0,000312067	0,002096242	0,022138359	0,000183419	0,002374961	0,026792981	7,823847032	0,004884515
PABT82	0,084532305	0,02999463	0,007729529	7,72953E-06	-5,11184699	-0,928393938	0,117925048	0,004210115	4,21012E-06	-5,375705995	-1,315093013	0,048406868	0,000351254	0,001172231	0,012379907	0,000206451	0,00267319	0,016431779	7,133928357	0,002139795
PABT83	0,084532305	0,030643059	0,006539947	6,53995E-06	-5,184425759	-1,004507294	0,098967524	0,004508452	4,50845E-06	-5,345972565	-1,286959241	0,051646484	0,000374761	0,000983785	0,010389724	0,000220268	0,002852093	0,014445869	6,810144422	0,002086837
PABT84	0,084532305	0,031786563	0,006873547	6,87355E-06	-5,162819121	-0,981848412	0,104268131	0,003038757	3,03876E-06	-5,517303982	-1,449073028	0,035557152	0,000258012	0,001036475	0,010946188	0,000151648	0,001963586	0,014097897	7,351983742	0,002336943
PABT85	0,084532305	0,054673512	0,013309342	1,33093E-05	-4,875843424	-0,680896998	0,208498532	0	0	0	0	0	0	0,002072575	0,021888415	0,000216826	0,002807528	0,004874007	8,64978903	0,004729143
PABT86	0,084532305	0,064342965	0,01505785	1,50579E-05	-4,822237028	-0,624679971	0,23731218	0	0	0	0	0	0	0,002358997	0,024911305	0	0	0,027272302	8,64978903	0,005565531
PABT87	0,084532305	0,064173896	0,012347482	1,23475E-05	-4,908421603	-0,715061735	0,192725093	0	0	0	0	0	0	0,00191578	0,020232502	0	0	0,022148281	8,64978903	0,005550907
PABT88	0,084532305	0,040060281	0,011117627	1,11176E-05	-4,953987889	-0,762847099	0,172644561	0,00216704	2,16704E-06	-5,664133125	-1,588002763	0,025822438	0,000187375	0,001716169	0,018124424	0,00011013	0,001426002	0,021376726	8,028214884	0,003216125
PABT89	0,084532305	0,084834211	0,02131317	2,13132E-05	-4,671351958	-0,466446798	0,341627798	0,004971054	4,97105E-06	-5,303551519	-1,246820447	0,056647344	0,000411049	0,003395944	0,035864478	0,000241596	0,003128257	0,042630275	7,966037494	0,006757925
PABT90	0,084532305	0,097425543	0,03033484	3,03348E-05	-4,518058294	-0,305687733	0,494666235	0,001954412	1,95441E-06	-5,708983924	-1,630440589									

PABT101	0,084532305	0,080550995	0,013160747	1,31607E-05	-4,880719462	-0,6860105	0,206058009	0	0	0	0	0	0	0,002048315	0,021632206	0	0	0,023680522	8,64978903	0,006967491
PABT102	0,084532305	0,048480671	0,009372905	9,37291E-06	-5,028125776	-0,840595501	0,144345915	0,00304334	3,04334E-06	-5,516649583	-1,448453836	0,035607884	0,000258381	0,001434867	0,0151536	0,000151864	0,001966387	0,018706719	7,670331885	0,003718628
PABT103	0,084532305	0,04278133	0,010114376	1,01144E-05	-4,995060921	-0,805920388	0,156343421	0,004640805	4,64081E-06	-5,333406633	-1,275069357	0,053079967	0,000385163	0,001554128	0,016413112	0,000226381	0,002931254	0,021124876	7,356863915	0,003147364
PABT104	0,084532305	0,015082858	0,002206955	2,39886E-06	-5,619994347	-1,461288071	0,034570999	0,002156022	2,3435E-06	-5,630134687	-1,555833441	0,027807795	0,000201781	0,00031616	0,003338959	0,00010911	0,001412789	0,005177018	6,1069924	0,000921109
PABT105	0,084532305	0,056069189	0,010052357	1,00524E-05	-4,997732075	-0,808721627	0,155338237	0	0	0	0	0	0	0,001544136	0,016307586	0	0	0,017851723	8,64978903	0,004849867
PABT106	0,084532305	0,048433012	0,007654801	7,97375E-06	-5,098337343	-0,914226372	0,121835438	0,00217815	2,26891E-06	-5,644183442	-1,569126373	0,026969545	0,000195698	0,001162658	0,012278807	0,000110422	0,001429775	0,014981662	7,760543385	0,003758665
PABT107	0,084532305	0,040666812	0,010816802	1,08168E-05	-4,96590112	-0,775340504	0,167748828	0,004753467	4,75347E-06	-5,322989525	-1,265212688	0,054298435	0,000394004	0,001667504	0,017610465	0,000231578	0,002998542	0,022508088	7,408463766	0,003012786
PABT108	0,084532305	0,070623609	0,020200728	2,02007E-05	-4,694632975	-0,490861601	0,322952313	0	0	0	0	0	0	0,0032103	0,033903905	0	0	0,037114205	8,64978903	0,006108793

Após a obtenção da contagem relativa ao ^{224}Ra , a atividade alfa foi normalmente calculada conforme descrito no item 3.3.8.

Anexo 4

Resultados da atividade alfa e beta total

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{208}Tl 583 keV	^{208}Tl 2614 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT01	1,377755058	1,97609587	1,676925	0,129436987	0,097897391	0,113667	0,638049738	2,428642391
PABT02	1,326532607	1,978434595	1,652484	0,536456025	0,492904904	0,51468	2,072688493	4,239852558
PABT03	0,914471043	1,917549358	1,41601	<LD	0,209417459	0,104709	0,093364694	1,614083624
PABT04	0,634567632	1,172614248	0,903591	<LD	0,162804225	0,081402	0,829413815	1,814406867
PABT05	0,500866525	0,716193432	0,60853	0,450401214	0,070434602	0,260418	1,739867514	2,608815402
PABT06	0,378676126	0,676508084	0,527592	<LD	<LD	<LD	0,496763529	1,024355634
PABT07	1,71510376	2,784204758	2,249654	0,218559996	0,423868671	0,321214	2,01687227	4,587740863
PABT08	1,979746128	3,043908815	2,511827	<LD	0,303343729	0,151672	0,077265001	2,740764337
PABT09	1,479392035	2,228132889	1,853762	0,268343483	0,554327137	0,411335	0,433722944	2,698820716
PABT10	1,153740049	2,226522057	1,690131	<LD	<LD	<LD	<LD	1,690131053
PABT11	2,282001376	3,99577677	3,138889	1,588552438	2,934477245	2,261515	<LD	5,400403915
PABT12	1,113214394	2,239747947	1,676481	0,236203296	0,626370233	0,431287	<LD	2,107767935
PABT13	1,104050517	1,827189765	1,46562	<LD	<LD	<LD	0,712860207	2,178480348
PABT14	1,407366065	2,637061176	2,022214	<LD	<LD	<LD	<LD	2,02221362
PABT15	0,61572022	0,623816029	0,619768	<LD	0,163518666	0,081759	2,709122366	3,410649823
PABT16	4,59851966	7,84099531	6,219757	0,54652972	0,663769175	0,605149	5,956350892	12,78125782
PABT17	4,411594049	6,534230394	5,472912	0,31839928	0,16264047	0,24052	1,530366375	7,243798472
PABT18	1,67629967	3,172601556	2,424451	<LD	0,260502726	0,130251	0,747450455	3,302152431
PABT19	0,949747189	2,519687183	1,734717	<LD	0,300182142	0,150091	<LD	1,884808257
PABT20	3,026694108	5,077623234	4,052159	0,140753723	0,515772777	0,328263	0,996792634	5,377214555
PABT21	3,761677029	5,992847864	4,877262	<LD	0,454208703	0,227104	2,665303885	7,769670683
PABT22	6,371542661	10,09834318	8,234943	<LD	0,477354311	0,238677	0,219701386	8,693321462
PABT23	1,043750404	1,65733728	1,350544	<LD	<LD	<LD	<LD	1,350543842
PABT24	0,128025408	0,160978725	0,144502	<LD	<LD	<LD	<LD	0,144502066
PABT25	0,160752763	0,084683335	0,122718	0,044310929	0,229041257	0,136676	<LD	0,259394142

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{208}Tl 583 keV	^{208}Tl 2614 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT26	0,014504399	0,206317896	0,110411	<LD	<LD	<LD	1,954617135	2,065028283
PABT27	0,719466005	1,294442731	1,006954	<LD	<LD	<LD	<LD	1,006954368
PABT28	1,170500366	1,835796981	1,503149	<LD	<LD	<LD	<LD	1,503148673
PABT29	5,257599199	7,747647984	6,502624	0,42920713	0,327770158	0,378489	<LD	6,881112235
PABT30	3,329796387	5,06174674	4,195772	<LD	0,25789274	0,128946	0,607619713	4,932337646
PABT31	1,173991399	1,620396095	1,397194	<LD	<LD	<LD	0,956008218	2,353201965
PABT32	0,913559352	1,836189271	1,374874	<LD	0,197065339	0,098533	<LD	1,473406981
PABT33	1,199547709	1,549768463	1,374658	<LD	<LD	<LD	0,339694885	1,714352972
PABT34	0,350672085	0,817554336	0,584113	<LD	0,079897765	0,039949	<LD	0,624062093
PABT35	0,773211132	0,805713812	0,789462	<LD	<LD	<LD	0,056330643	0,845793115
PABT36	0,670382975	1,212040857	0,941212	<LD	<LD	<LD	<LD	0,941211916
PABT37	0,826129226	1,713757893	1,269944	<LD	<LD	<LD	<LD	1,269943559
PABT38	3,327258783	5,809277405	4,568268	0,045754205	0,28783065	0,166792	0,338539142	5,073599664
PABT39	2,122407111	3,488799155	2,805603	<LD	0,332928467	0,166464	0,233218847	3,205286214
PABT40	0,958205692	1,547761489	1,252984	<LD	<LD	<LD	0,144295579	1,39727917
PABT41	0,532349175	1,215905394	0,874127	<LD	<LD	<LD	0,190127578	1,064254862
PABT42	0,778795406	1,59623085	1,187513	0,059443991	<LD	0,029722	<LD	1,217235124
PABT43	0,531887444	0,811741372	0,671814	0,018776252	0,364441522	0,191609	0,530758469	1,394181764
PABT44	1,883366283	3,018280306	2,450823	<LD	<LD	<LD	0,233606347	2,684429641
PABT45	0,821001062	1,34677002	1,083886	<LD	<LD	<LD	<LD	1,083885541
PABT46	1,076809459	1,977479523	1,527144	<LD	0,103020549	0,05151	<LD	1,578654766
PABT47	0,597576461	1,24903698	0,923307	<LD	<LD	<LD	0,563469521	1,486776241
PABT48	0,57857191	1,335223778	0,956898	<LD	<LD	<LD	0,669980818	1,626878662
PABT49	2,590567643	3,917351261	3,253959	0,755490415	1,109925095	0,932708	0,78446395	4,971131156
PABT50	0,438574174	1,145868147	0,792221	<LD	<LD	<LD	0,4847575	1,276978661

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/g) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/g) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{208}Tl 583 keV	^{208}Tl 2614 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT51	0,644627506	1,077554417	0,861091	<LD	0,079271055	0,039636	<LD	0,900726489
PABT52	1,467371353	2,814876384	2,141124	<LD	<LD	<LD	<LD	2,141123869
PABT53	1,563643739	2,762426804	2,163035	<LD	0,063240601	0,03162	<LD	2,194655572
PABT54	0,279152646	0,644980952	0,462067	<LD	<LD	<LD	0,111070413	0,573137212
PABT55	1,084137797	2,240506976	1,662322	<LD	<LD	<LD	0,740738318	2,403060705
PABT56	0,457614006	1,100408615	0,779011	0,001226119	<LD	0,000613	0,38851513	1,168139501
PABT57	0,304790372	0,546304398	0,425547	<LD	0,135276609	0,067638	<LD	0,493185689
PABT58	1,004005932	2,063981247	1,533994	0,112855596	0,81328764	0,463072	0,137573264	2,134638472
PABT59	1,15735509	1,752334723	1,454845	0,119860764	<LD	0,05993	0,29642006	1,811195349
PABT60	1,242071713	2,254150866	1,748111	<LD	0,485217685	0,242609	<LD	1,990720132
PABT61	0,23947617	0,659459069	0,449468	<LD	<LD	<LD	0,173215281	0,622682901
PABT62	0,441373131	1,452271786	0,946822	<LD	0,575763894	0,287882	1,10559501	2,340299415
PABT63	1,357758514	2,367409301	1,862584	<LD	0,785433675	0,392717	<LD	2,255300744
PABT64	4,486446194	7,480180978	5,983314	0,372116905	0,872780202	0,622449	0,490360226	7,096122365
PABT65	0,931861046	1,663091835	1,297476	0,391967089	<LD	0,195984	<LD	1,493459985
PABT66	1,393584792	2,530987102	1,962286	0,048034779	<LD	0,024017	0,096175686	2,082479023
PABT67	0,147525774	0,606094455	0,37681	<LD	<LD	<LD	<LD	0,376810114
PABT68	0,520446347	0,893793316	0,70712	<LD	0,007671005	0,003836	0,121352159	0,832307492
PABT69	0,563971211	1,30713216	0,935552	<LD	0,014336974	0,007168	0,457040757	1,39976093
PABT70	0,36697318	0,833936085	0,600455	<LD	<LD	<LD	0,246264792	0,846719424
PABT71	0,821721062	0,892144937	0,856933	<LD	0,081828601	0,040914	<LD	0,8978473
PABT72	0,925575342	1,766752239	1,346164	0,285713557	<LD	0,142857	0,132173528	1,621194097
PABT73	0,446708655	1,106978315	0,776843	0,14464226	0,512396907	0,32852	0,574386391	1,67974946
PABT74	0,659165804	1,063156283	0,861161	<LD	0,016628985	0,008314	0,39357652	1,263052056
PABT75	0,361614191	0,766167324	0,563891	<LD	0,006930551	0,003465	0,636802328	1,204158362

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{208}Tl 583 keV	^{208}Tl 2614 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT76	0,467739906	0,758366883	0,613053	<LD	<LD	<LD	0,298194386	0,911247781
PABT77	0,587857449	1,094343813	0,841101	<LD	<LD	<LD	0,306855934	1,147956565
PABT78	0,83246547	1,456665736	1,144566	<LD	<LD	<LD	<LD	1,144565603
PABT79	1,151250219	2,274433251	1,712842	<LD	<LD	<LD	0,423492762	2,136334497
PABT80	2,016742641	3,696644739	2,856694	0,390071213	0,188664904	0,289368	0,41642474	3,562486488
PABT81	0,951154394	1,582151396	1,266653	<LD	0,277414342	0,138707	0,189901516	1,595261582
PABT82	0,50412106	0,805044204	0,654583	<LD	<LD	<LD	<LD	0,654582632
PABT83	0,411929871	0,734303909	0,573117	<LD	0,045256266	0,022628	0,506075281	1,101820304
PABT84	0,439347863	1,126355401	0,782852	<LD	<LD	<LD	0,300156333	1,083007965
PABT85	0,831585615	2,340921462	1,586254	<LD	<LD	<LD	0,154896352	1,741149891
PABT86	1,011608942	1,798177505	1,404893	0,150460359	0,407377528	0,278919	0,418608606	2,102420773
PABT87	0,863387496	1,459254371	1,161321	0,016464032	0,369407248	0,192936	<LD	1,354256573
PABT88	0,800082359	1,421047739	1,110565	<LD	<LD	<LD	0,076129604	1,186694653
PABT89	1,597858878	2,446371809	2,022115	0,152803769	0,536553097	0,344678	0,421131277	2,787925053
PABT90	2,090689431	3,620650708	2,85567	0,22825901	0,575617233	0,401938	0,316393904	3,574002094
PABT91	1,36510585	1,718180875	1,541643	0,492651622	<LD	0,246326	0,180057656	1,968026829
PABT92	0,835326561	1,435665956	1,135496	0,301175332	<LD	0,150588	0,662224353	1,948308277
PABT93	0,489431697	0,819730969	0,654581	1,328568268	2,729358065	2,028963	0,145072493	2,828616993
PABT94	0,627374475	1,798237722	1,212806	<LD	<LD	<LD	0,192734876	1,405540975
PABT95	0,760026672	1,840031037	1,300029	<LD	0,070544439	0,035272	<LD	1,335301074
PABT96	1,182950979	2,128045741	1,655498	0,246510358	<LD	0,123255	<LD	1,778753539
PABT97	0,505410123	1,170072227	0,837741	0,051374155	0,022868291	0,037121	<LD	0,874862398
PABT98	0,919259315	1,694644433	1,306952	<LD	<LD	<LD	<LD	1,306951874
PABT99	0,614036011	1,27259557	0,943316	<LD	<LD	<LD	<LD	0,94331579
PABT100	1,327376477	1,834228246	1,580802	0,171914339	0,270710989	0,221313	<LD	1,802115026

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{208}Tl 583 keV	^{208}Tl 2614 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT101	1,231326511	1,222089559	1,226708	<LD	<LD	<LD	0,339186161	1,565894196
PABT102	0,602091364	0,929040741	0,765566	0,1064406	<LD	0,05322	<LD	0,818786352
PABT103	0,86560174	1,613600299	1,239601	<LD	0,016142098	0,008071	0,273446181	1,52111825
PABT104	0,19250257	0,571502588	0,382003	<LD	<LD	<LD	0,408534502	0,790537081
PABT105	0,738668832	0,973071675	0,85587	0,008937513	0,119150146	0,064044	0,647066876	1,566980958
PABT106	0,556366152	1,145452574	0,850909	<LD	<LD	<LD	0,54917213	1,400081493
PABT107	0,757902065	1,371696987	1,0648	0,029811692	0,293857153	0,161834	0,150050499	1,376684447
PABT108	1,445544643	1,810783054	1,628164	0,048792084	<LD	0,024396	0,471725178	2,124285068
Médias			1,63			0,16	043	2,20

LD: Limite de Detecção

Resultados finais da atividade beta total obtida pela somatória da atividade beta das séries de decaimento do tório, urânio e potássio obtidas através dos radionuclídeos ^{208}Tl , ^{214}Bi e ^{40}K , respectivamente.

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{228}Ac 911 keV	^{228}Ac 968 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT01	0,06868868	0,19447943	0,131584	0,129436987	0,097897391	0,113667	0,638049738	0,883300982
PABT02	0,262408217	0,141069463	0,201739	0,536456025	0,492904904	0,51468	2,072688493	2,789107797
PABT03	0,093963658	0,217127476	0,155546	<LD	0,209417459	0,104709	0,093364694	0,35361899
PABT04	<LD	0,080735944	0,040368	<LD	0,162804225	0,081402	0,829413815	0,951183899
PABT05	0,177743503	0,323282166	0,250513	0,450401214	0,070434602	0,260418	1,739867514	2,250798257
PABT06	<LD	0,050431435	0,025216	<LD	<LD	<LD	0,496763529	0,521979246
PABT07	<LD	0,131459182	0,06573	0,218559996	0,423868671	0,321214	2,01687227	2,403816194
PABT08	0,144247473	0,284779666	0,214514	<LD	0,303343729	0,151672	0,077265001	0,443450435
PABT09	0,142587429	0,261694821	0,202141	0,268343483	0,554327137	0,411335	0,433722944	1,047199379
PABT10	0,013312002	<LD	0,006656	<LD	<LD	<LD	<LD	0,006656001
PABT11	0,268285823	0,394155617	0,331221	1,588552438	2,934477245	2,261515	<LD	2,592735562
PABT12	<LD	0,090915904	0,045458	0,236203296	0,626370233	0,431287	<LD	0,476744716
PABT13	<LD	0,024334608	0,012167	<LD	<LD	<LD	0,712860207	0,725027511
PABT14	<LD	0,117298881	0,058649	<LD	<LD	<LD	<LD	0,05864944
PABT15	<LD	0,231001247	0,115501	<LD	0,163518666	0,081759	2,709122366	2,906382322
PABT16	1,952501675	1,985876745	1,969189	0,54652972	0,663769175	0,605149	5,956350892	8,530689549
PABT17	0,431956636	0,09941439	0,265686	0,31839928	0,16264047	0,24052	1,530366375	2,036571763
PABT18	0,063424533	0,115295732	0,08936	<LD	0,260502726	0,130251	0,747450455	0,96706195
PABT19	0,066878014	<LD	0,033439	<LD	0,300182142	0,150091	<LD	0,183530078
PABT20	0,183450385	0,15371575	0,168583	0,140753723	0,515772777	0,328263	0,996792634	1,493638952
PABT21	0,169789097	0,105892383	0,137841	<LD	0,454208703	0,227104	2,665303885	3,030248976
PABT22	0,086075546	0,048332533	0,067204	<LD	0,477354311	0,238677	0,219701386	0,525582581
PABT23	0,034196293	0,065798298	0,049997	<LD	<LD	<LD	<LD	0,049997296
PABT24	0,221862928	0,019039428	0,120451	<LD	<LD	<LD	<LD	0,120451178
PABT25	0,072356075	0,052214511	0,062285	0,044310929	0,229041257	0,136676	<LD	0,198961386

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{228}Ac 911 keV	^{228}Ac 968 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT26	0,053534819	0,000745282	0,02714	<LD	<LD	<LD	1,954617135	1,981757186
PABT27	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
PABT28	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
PABT29	0,023229876	0,362751632	0,192991	0,42920713	0,327770158	0,378489	<LD	0,571479398
PABT30	0,106963648	0,00803889	0,057501	<LD	0,25789274	0,128946	0,607619713	0,794067352
PABT31	<LD	0,047293164	0,023647	<LD	<LD	<LD	0,956008218	0,9796548
PABT32	<LD	0,038905171	0,019453	<LD	0,197065339	0,098533	<LD	0,117985255
PABT33	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,339694885	0,339694885
PABT34	<LD	<LD	<LD	<LD	0,079897765	0,039949	<LD	0,039948883
PABT35	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,056330643	0,056330643
PABT36	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
PABT37	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
PABT38	0,004387646	<LD	0,002194	0,045754205	0,28783065	0,166792	0,338539142	0,507525393
PABT39	<LD	0,10466804	0,052334	<LD	0,332928467	0,166464	0,233218847	0,452017101
PABT40	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,144295579	0,144295579
PABT41	0,012183719	<LD	0,006092	<LD	<LD	<LD	0,190127578	0,196219437
PABT42	<LD	0,087214433	0,043607	0,059443991	<LD	0,029722	<LD	0,073329212
PABT43	<LD	0,095182814	0,047591	0,018776252	0,364441522	0,191609	0,530758469	0,769958763
PABT44	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,233606347	0,233606347
PABT45	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
PABT46	0,021051811	<LD	0,010526	<LD	0,103020549	0,05151	<LD	0,06203618
PABT47	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,563469521	0,563469521
PABT48	0,006844213	<LD	0,003422	<LD	<LD	<LD	0,669980818	0,673402924
PABT49	0,160134145	0,065155058	0,112645	0,755490415	1,109925095	0,932708	0,78446395	1,829816306
PABT50	<LD	0,017025528	0,008513	<LD	<LD	<LD	0,4847575	0,493270264

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/g) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/g) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{228}Ac 911 keV	^{228}Ac 968 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT51	0,025596822	<LD	0,012798	<LD	0,079271055	0,039636	<LD	0,052433938
PABT52	0,095339862	0,012865373	0,054103	<LD	<LD	<LD	<LD	0,054102618
PABT53	<LD	<LD	<LD	<LD	0,063240601	0,03162	<LD	0,0316203
PABT54	0,055706872	<LD	0,027853	<LD	<LD	<LD	0,111070413	0,138923849
PABT55	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,740738318	0,740738318
PABT56	0,028340276	0,014942264	0,021641	0,001226119	<LD	0,000613	0,38851513	0,41076946
PABT57	0,044247427	<LD	0,022124	<LD	0,135276609	0,067638	<LD	0,089762018
PABT58	0,201895232	<LD	0,100948	0,112855596	0,81328764	0,463072	0,137573264	0,701592498
PABT59	<LD	<LD	<LD	0,119860764	<LD	0,05993	0,29642006	0,356350442
PABT60	0,135401393	<LD	0,067701	<LD	0,485217685	0,242609	<LD	0,310309539
PABT61	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,173215281	0,173215281
PABT62	<LD	<LD	<LD	<LD	0,575763894	0,287882	1,10559501	1,393476957
PABT63	<LD	<LD	<LD	<LD	0,785433675	0,392717	<LD	0,392716837
PABT64	<LD	0,087497129	0,043749	0,372116905	0,872780202	0,622449	0,490360226	1,156557344
PABT65	0,086170196	<LD	0,043085	0,391967089	<LD	0,195984	<LD	0,239068643
PABT66	0,111629193	<LD	0,055815	0,048034779	<LD	0,024017	0,096175686	0,176007672
PABT67	0,216632235	0,028851821	0,122742	<LD	<LD	<LD	<LD	0,122742028
PABT68	<LD	0,021519038	0,01076	<LD	0,007671005	0,003836	0,121352159	0,13594718
PABT69	0,062853952	<LD	0,031427	<LD	0,014336974	0,007168	0,457040757	0,495636221
PABT70	<LD	0,014148197	0,007074	<LD	<LD	<LD	0,246264792	0,253338891
PABT71	<LD	<LD	<LD	<LD	0,081828601	0,040914	<LD	0,040914301
PABT72	0,08967957	<LD	0,04484	0,285713557	<LD	0,142857	0,132173528	0,319870092
PABT73	0,262167989	0,1431468	0,202657	0,14464226	0,512396907	0,32852	0,574386391	1,105563369
PABT74	0,016410306	0,146113046	0,081262	<LD	0,016628985	0,008314	0,39357652	0,483152688
PABT75	0,025596822	<LD	0,012798	<LD	0,006930551	0,003465	0,636802328	0,640267604

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{228}Ac 911 keV	^{228}Ac 968 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT76	<LD	0,032453143	0,016227	<LD	<LD	<LD	0,298194386	0,314420958
PABT77	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,306855934	0,306855934
PABT78	0,164039896	0,009712367	0,086876	<LD	<LD	<LD	<LD	0,086876131
PABT79	<LD	0,01256647	0,006283	<LD	<LD	<LD	0,423492762	0,429775997
PABT80	0,647370083	<LD	0,323685	0,390071213	0,188664904	0,289368	0,41642474	1,02947784
PABT81	0,115600123	<LD	0,0578	<LD	0,277414342	0,138707	0,189901516	0,386408748
PABT82	<LD	0,111229427	0,055615	<LD	<LD	<LD	<LD	0,055614714
PABT83	<LD	<LD	<LD	<LD	0,045256266	0,022628	0,506075281	0,528703414
PABT84	<LD	0,071417868	0,035709	<LD	<LD	<LD	0,300156333	0,335865267
PABT85	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,154896352	0,154896352
PABT86	0,031402354	0,172754821	0,102079	0,150460359	0,407377528	0,278919	0,418608606	0,799606137
PABT87	0,059556528	<LD	0,029778	0,016464032	0,369407248	0,192936	<LD	0,222713904
PABT88	0,033499179	<LD	0,01675	<LD	<LD	<LD	0,076129604	0,092879194
PABT89	0,119876523	0,031153586	0,075515	0,152803769	0,536553097	0,344678	0,421131277	0,841324764
PABT90	0,184749659	0,101784173	0,143267	0,22825901	0,575617233	0,401938	0,316393904	0,861598941
PABT91	0,026854954	0,244809912	0,135832	0,492651622	<LD	0,246326	0,180057656	0,5622159
PABT92	<LD	0,048879225	0,02444	0,301175332	<LD	0,150588	0,662224353	0,837251631
PABT93	0,027546093	0,130750522	0,079148	1,328568268	2,729358065	2,028963	0,145072493	2,253183968
PABT94	0,01956695	<LD	0,009783	<LD	<LD	<LD	0,192734876	0,202518351
PABT95	<LD	<LD	<LD	<LD	0,070544439	0,035272	<LD	0,035272219
PABT96	<LD	<LD	<LD	0,246510358	<LD	0,123255	<LD	0,123255179
PABT97	0,039927619	<LD	0,019964	0,051374155	0,022868291	0,037121	<LD	0,057085033
PABT98	0,031637203	<LD	0,015819	<LD	<LD	<LD	<LD	0,015818602
PABT99	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
PABT100	0,004147796	<LD	0,002074	0,171914339	0,270710989	0,221313	<LD	0,223386562

LD: Limite de Detecção

Amostras	Atividade β (Bq/L) SÉRIE TÓRIO			Atividade β (Bq/L) SÉRIE URÂNIO			Atividade β (Bq/L) ^{40}K	Atividade β Total (Bq/L)
	^{228}Ac 911 keV	^{228}Ac 968 keV	Média	^{214}Bi 1120 keV	^{214}Bi 1764 keV	Média		
PABT101	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,339186161	0,339186161
PABT102	0,006965998	<LD	0,003483	0,1064406	<LD	0,05322	<LD	0,056703299
PABT103	<LC	<LD	<LD	<LD	0,016142098	0,008071	0,273446181	0,28151723
PABT104	<LC	0,049531	0,024765	<LD	<LD	<LD	0,408534502	0,433300002
PABT105	0,153290507	<LD	0,076645	0,008937513	0,119150146	0,064044	0,647066876	0,787755959
PABT106	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,54917213	0,54917213
PABT107	0,000512075	0,051527462	0,02602	0,029811692	0,293857153	0,161834	0,150050499	0,33790469
PABT108	<LD	0,024814886	0,012407	0,048792084	<LD	0,024396	0,471725178	0,508528662
Médias			0,07			0,16	043	0,65

LD: Limite de Detecção

Resultados finais da atividade beta total obtida pela somatória da atividade beta das séries de decaimento do tório, urânio e potássio obtidas através dos radionuclídeos ^{228}Ac , ^{214}Bi e ^{40}K , respectivamente.

Amostra	Atividade α (Bq/l)	Atividade α (Bq/l)	ATIVIDADE α TOTAL (Bq/l)
	^{226}Ra aprox. 186 keV	^{224}Ra aprox. 241 keV	
PABT01	0,942982582	1,712130305	2,655112887
PABT02	1,427037326	1,724882039	3,151919366
PABT03	0,189450699	2,065954175	2,255404874
PABT04	1,197278675	1,225956068	2,423234744
PABT05	1,104869273	0,94093717	2,045806443
PABT06	<LD	0,966570446	0,966570446
PABT07	0,849616601	2,63462713	3,484243731
PABT08	<LD	2,741016547	2,741016547
PABT09	<LD	2,990283427	2,990283427
PABT10	<LD	2,89407761	2,89407761
PABT11	<LD	4,769704971	4,769704971
PABT12	<LD	2,244553469	2,244553469
PABT13	<LD	3,359738711	3,359738711
PABT14	<LD	2,632113874	2,632113874
PABT15	<LD	1,613871022	1,613871022
PABT16	2,813543889	8,829482727	11,64302662
PABT17	0,356586476	8,034252371	8,390838847
PABT18	1,002406924	3,932065177	4,934472101
PABT19	<LD	3,260119313	3,260119313
PABT20	1,676305294	5,395057074	7,071362368
PABT21	1,668661586	6,053491204	7,72215279
PABT22	2,293371509	11,27563152	13,56900303
PABT23	0,812522112	2,001553738	2,81407585
PABT24	<LD	<LD	<LD
PABT25	1,152663016	0,786589676	1,939252693
PABT26	<LD	<LD	<LD
PABT27	0,580339244	2,865393363	3,445732607
PABT28	<LD	3,58385293	3,58385293
PABT29	<LD	11,18953159	11,18953159
PABT30	0,739800737	6,031466861	6,771267598
PABT31	1,383724851	2,437946357	3,821671208
PABT32	0,737654516	1,70965649	2,447311006
PABT33	0,177489488	2,746926144	2,924415632
PABT34	0,543991029	1,284563054	1,828554083
PABT35	<LD	2,490147141	2,490147141
PABT36	1,196444509	1,614329911	2,81077442
PABT37	<LD	1,961993076	1,961993076
PABT38	1,195465257	6,442320498	7,637785755
PABT39	<LD	4,682731264	4,682731264

LD: Limite de Detecção

Amostra	Atividade α (Bq/l)	Atividade α (Bq/l)	ATIVIDADE α TOTAL (Bq/l)
	226Ra aprox. 186 keV	224Ra aprox. 241 keV	
PABT40	0,492149093	2,275900138	2,768049231
PABT41	0,120844748	1,737544376	1,858389124
PABT42	<LD	2,729494351	2,729494351
PABT43	<LD	1,984437382	1,984437382
PABT44	1,42369361	3,693368349	5,117061959
PABT45	0,384542788	2,599696489	2,984239277
PABT46	<LD	3,537612115	3,537612115
PABT47	0,764645026	2,147407824	2,91205285
PABT48	<LD	2,180913837	2,180913837
PABT49	1,604804371	4,683974779	6,28877915
PABT50	<LD	1,449750559	1,449750559
PABT51	0,009000336	2,442570436	2,451570772
PABT52	0,64112107	3,152163046	3,793284116
PABT53	1,096908829	3,270101817	4,367010646
PABT54	0,540952818	0,90389362	1,444846438
PABT55	0,86473541	2,776375159	3,641110569
PABT56	0,423072625	1,366772033	1,789844658
PABT57	<LD	1,339089978	1,339089978
PABT58	0,512468181	2,218721885	2,731190066
PABT59	<LD	3,311553633	3,311553633
PABT60	<LD	3,111742942	3,111742942
PABT61	0,508174841	0,828533892	1,336708733
PABT62	1,095163564	1,388459923	2,483623487
PABT63	<LD	3,410863919	3,410863919
PABT64	<LD	8,891872839	8,891872839
PABT65	<LD	2,926054067	2,926054067
PABT66	0,549239061	2,816569888	3,365808949
PABT67	0,196628901	0,821742729	1,01837163
PABT68	0,398706964	1,301256015	1,699962979
PABT69	1,154868465	1,270327572	2,425196037
PABT70	0,815051892	0,878538063	1,693589955
PABT71	<LD	1,782734402	1,782734402
PABT72	0,948953949	1,642308986	2,591262935
PABT73	1,05092426	1,26819938	2,319123639
PABT74	0,724272273	1,467643325	2,191915598
PABT75	0,292953096	1,04266014	1,335613236
PABT76	0,471522851	1,108920312	1,580443162
PABT77	0,787708275	1,757039479	2,544747754
PABT78	0,634810627	1,691839016	2,326649642

LD: Limite de Detecção

Amostra	Atividade α (Bq/l)	Atividade α (Bq/l)	ATIVIDADE α TOTAL (Bq/l)
	226Ra aprox. 186 keV	224Ra aprox. 241 keV	
PABT79	1,219005314	2,540180333	3,759185647
PABT80	1,397405076	3,715844285	5,113249361
PABT81	0,784126022	1,993512559	2,777638581
PABT82	0,88854658	0,873312763	1,761859343
PABT83	0,951510599	0,851698717	1,803209316
PABT84	0,64133097	0,953774432	1,595105402
PABT85	<LD	1,829096893	1,829096893
PABT86	<LD	2,27145505	2,27145505
PABT87	<LD	2,265486504	2,265486504
PABT88	0,45735462	1,312594393	1,769949013
PABT89	1,049142974	2,758105876	3,807248849
PABT90	0,412479407	3,357076982	3,769556389
PABT91	0,689709571	2,125902238	2,815611809
PABT92	<LD	2,37073718	2,37073718
PABT93	1,275947882	1,015351336	2,291299218
PABT94	<LD	1,556904151	1,556904151
PABT95	0,950242388	1,240874573	2,191116961
PABT96	<LD	2,863795409	2,863795409
PABT97	0,759690247	0,991393203	1,75108345
PABT98	<LD	1,720172787	1,720172787
PABT99	0,822527373	1,363796707	2,18632408
PABT100	<LD	3,339010108	3,339010108
PABT101	<LD	2,843635873	2,843635873
PABT102	0,642298062	1,517680443	2,159978505
PABT103	0,979443891	1,284530935	2,263974826
PABT104	0,494597034	0,40862106	0,903218095
PABT105	2,250776584	1,979371679	4,230148262
PABT106	0,478853595	1,597938043	2,076791639
PABT107	1,003221129	1,229605659	2,232826787
PABT108	<LD	2,493176269	2,493176269
Médias	0,56	2,58	3,14

LD: Limite de Detecção

Resultados finais da atividade alfa total obtida pela somatória da atividade alfa das séries de decaimento do tório e urânio, obtidas através dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{214}Ra , respectivamente.