AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Avaliação das concentrações dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po e
caracterização química inorgânica das águas minerais do Parque das Águas de
Cambuquira e Marimbeiro, MG.**

Laíssa Adriana Bonifacio dos Santos

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Sandra Regina Damatto**

**São Paulo
2018**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Avaliação das concentrações dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po e
caracterização química inorgânica das águas minerais do Parque das Águas de
Cambuquira e Marimbeiro, MG.**

Laíssa Adriana Bonifacio dos Santos

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Sandra Regina Damatto**

**Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN**

**São Paulo
2018**

Fonte de Financiamento: CNPq

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Como citar:

SANTOS, L. A. B. ***Avaliação das concentrações dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po e caracterização química inorgânica das águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira e Marimbeiro, MG***. 2018. 145 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <www.teses.usp.br> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Laíssa Adriana Bonifacio dos
Avaliação das concentrações dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra ,
 ^{210}Pb , ^{210}Po e caracterização química inorgânica das águas
minerais do Parque das Águas de Cambuquira e Marimbeiro, MG/
Laíssa Adriana Bonifacio Santos; orientador Sandra Regina Damatto.
São Paulo, 2018.
145 p.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Aplicações) - Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.

1. Água mineral. 2. radionuclídeos naturais. 3. caracterização química inorgânica. 4. Parque das Águas de Cambuquira e Marimbeiro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me acompanhar e amparar durante toda essa trajetória.

Minha amada família, em especial minha mãe Priscila Bonifacio, minha avó Josefina Baieta Bonifacio, meu tio Felipe Bonifacio e meu marido Bruno dos Santos por sempre ficarem ao meu lado; meu amor por vocês é incondicional.

Minha orientadora, Dra. Sandra Regina Damatto, pelo conhecimento transmitido, por toda a compreensão, amizade, paciência e pela dedicação com todo esse trabalho.

Dra. Vera Lucia Salvador, por todo ensinamento, amizade e auxílio para a conclusão deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pela oportunidade e estrutura para a realização dessa pesquisa.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

A Dra. Bárbara Paci Mazzilli e Dra. Linda Caldas, pela oportunidade de realizar esse trabalho no Laboratório de Radiometria Ambiental, do Centro de Metrologia das Radiações.

A Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo, por ser integrante da minha banca de exame de capacidade e seminário de área, sua sabedoria e contribuições me ajudaram muito no decorrer do trabalho.

A Dra. Joselene de Oliveira, pela idealização do projeto de mestrado do qual o meu mestrado fez parte, pelos ensinamentos, conversas e experiências durante a iniciação científica.

Minha amiga e companheira durante a iniciação científica/estágio e mestrado MSc. Tamires de Araujo Mora (Tamy), pelos almoços divertidos, conversas, risadas e ótimos momentos compartilhados dentro e fora do laboratório.

A Gleyka Damasceno (Gley) e Graziela Mendonça (Grazi), pela amizade, por aguentarem minhas cantorias e também pelos momentos de

descontração, também ao MSc. Joseilton Marques pela amizade e ajuda no trabalho.

É bom dividir momento com pessoas especiais como vocês.

Aos Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro e CODEMIG.

Aos colegas Arthur Athayde, Denise Sanny, Amanda Prilip e Amanda Shigasi pela ajuda nas coletas realizadas nos parques e pelos bons momentos passados no laboratório.

A todos os alunos e funcionários do Laboratório de Radiometria Ambiental: Dr. Marcelo Bessa Nisti, MSc. Luiz Flávio, MSc. Marcos Medrado, Dr. Marcelo Francis Máduar, Dra. Marcia Campos, MSc. Paulo Renê, MSc. Carolina Silva, Dra. Fernanda Cavalcante, MSc. Alice Costa, Thiago Oliveira, Pedro, Letícia Lavieri, Andressa Nery, Bruna Castilho, Guilherme Reis, Gabriel Beraldo, Carlos Eduardo (Cadu), MSc. Crislene Mateus, MSc. Leandro Fonseca, MSc. Aline Ramos, André Rodrigo, MSc. Levi Francisco, MSc. Rosa Szarota, MSc. Luciano Hasimoto, Dr. Ademar, MSc. Livia Barros, Donilda, Sandro, Vanessa, Márcia e todos que de uma forma ou de outra me enriqueceram com a companhia e convivência, meu muito obrigado.

A Dra. Andreza Portella, Dr. Lucio Leonardo, Dra. Cátia Saueia e Dr. Pedro Miranda, agradeço por participarem como membros da minha banca, suas contribuições me ajudaram muito.

Também agradeço aos colegas que fiz no CRPq e em outros setores do IPEN, pelos ótimos momentos vividos com vocês.

As pessoas que não foram citadas, mas que ao passar na minha vida sei que também contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal.

“Só se vê bem com o coração, o essencial é invisível aos olhos”.

Antoine de Saint-Exupéry

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo,
participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade”.

Marie Curie

RESUMO

SANTOS, L.A.B. **Avaliação das concentrações dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po e caracterização química inorgânica das águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira e Marimbeiro, MG.** 2018. 145 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

A exposição a fontes naturais de radiação contribui com mais de 98% da dose de radiação normalmente recebida da população; esta dose é principalmente atribuída à incorporação de radionuclídeos naturais das séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th que possuem meia-vidas relativamente longas. A qualidade da água para consumo humano deve ser constantemente analisada e, um parâmetro muito importante analisado é a radioatividade natural presente. Quando os radionuclídeos naturais estão presentes em águas minerais há uma maior preocupação, pois estas águas podem conter concentrações moderadamente elevadas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn originalmente dissolvidas e dos radionuclídeos ^{210}Pb e ^{210}Po , que embora apresentem menores concentrações, contribuem para um aumento da irradiação interna e externa dos indivíduos. As áreas de estudo do presente trabalho foram os Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro e de uma fonte particular de uma fazenda localizados na cidade de Cambuquira, Minas Gerais, onde as águas minerais são frequentemente utilizadas para consumo humano e uso médico. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar as concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb e ^{210}Po , avaliar as doses efetivas comprometidas devido ao consumo e fazer a caracterização química inorgânica destas águas minerais. Os radionuclídeos foram determinados por medida alfa e beta total e espectrometria alfa, após separação radioquímica em coletas realizadas sazonalmente. Para a caracterização química inorgânica foram determinadas as concentrações dos elementos As, Ag, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Se, Ti e V por fluorescência de raios X. As concentrações de atividades dos radionuclídeos variaram de 4 ± 1 mBq/l a 509 ± 32 mBq/l para ^{226}Ra , de $3,7 \pm 0,1$ mBq/l a 631 ± 27 mBq/l para ^{228}Ra , de 5 ± 1 mBq/l a 60 ± 5 mBq/l para ^{210}Pb e de abaixo do limite de detecção da metodologia a

36 ± 2 mBq/l para o ^{210}Po . A dose efetiva comprometida máxima em adultos foi de 0,12 mSv/a para ^{226}Ra , 0,32 mSv/a para ^{228}Ra , 0,03 mSv/a para ^{210}Pb e para ^{210}Po 0,031 mSv/a. Dentre os elementos analisados por fluorescência de raios X, os elementos Ag, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Se e Ti apresentaram valores abaixo do limite mínimo de detecção da metodologia. Os elementos Ba e Co, considerados contaminantes nas águas minerais, apresentaram valores maiores do que estabelecido pela ANVISA e CONAMA para águas minerais, respectivamente. No entanto, trabalhos da literatura brasileira realizados com água mineral de em outros locais apresentaram valores próximos ao do presente estudo, mostrando que concentrações acima do limite podem representar uma anomalia natural do aquífero.

Palavras Chave: radionuclídeos naturais; caracterização química inorgânica; água mineral; Parque das Águas de Cambuquira e Marimbeiro

ABSTRACT

SANTOS, L. A. B. **Assessment of ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po radionuclides concentrations and inorganic chemical characterization of the mineral waters from Water Parks of Cambuquira and Marimbeiro, MG.** 2018. 145 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

Exposure to natural sources of radiation contributes more than 98% of the radiation dose normally received from the population; this dose is mainly attributed to the incorporation of natural radionuclides from the ^{238}U and ^{232}Th decay series which have relatively long half-lives. The quality of the water for human consumption must be constantly analyzed and, a very important parameter analyzed is the presence of the natural radioactivity. When the natural radionuclides are present in mineral waters there is a greater concern because these waters may contain somewhat high concentrations of ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{222}Rn originally dissolved and the radionuclides ^{210}Pb and ^{210}Po , which, although presenting lower concentrations, contribute to an increase in irradiation both internal and external. The study areas of the present work were the Water Parks of Cambuquira and Marimbeiro and a private spring of a farm located in the city of Cambuquira, Minas Gerais, where the mineral waters are frequently used for human consumption and medical use. Thus, the objective of this work was to determine the activity concentrations of the radionuclides ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{210}Pb and ^{210}Po , to evaluate the committed effective doses and to perform the inorganic chemical characterization of these mineral waters due to their consumption. The natural radionuclides were determined by gross alpha and beta measurement and alpha spectrometry, after radiochemical separation in samplings carried out seasonally; for the inorganic chemical characterization the elements As, Ag, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Se, Ti and V concentrations were determined by X-ray fluorescence. The activity concentrations of the radionuclides varied from 4 ± 1 mBq/l to 509 ± 32 mBq/l for ^{226}Ra , from 3.7 ± 0.1 mBq/l to 631 ± 27 mBq/l for ^{228}Ra , 5 ± 1 mBq/(LID) to 36 ± 2 mBq/l for the ^{210}Pb and below the detection limit to 60 ± 5 mBq/l for ^{210}Po . The maximum committed effective doses in adults for ^{226}Ra was 0,12 mSv/y, 0,32 mSv/y for ^{228}Ra , 0,03 mSv/y for ^{210}Pb and 0,031 mSv/y for

²¹⁰Po. Among the elements analyzed by X-ray fluorescence, the elements Ag, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Se and Ti presented values below the minimum limit of detection. The elements, such as Ba and Co, considered contaminants in mineral waters, presented higher values than established by ANVISA and CONAMA for mineral waters, respectively. However, Brazilian literature studies with mineral water from other sites presented values similar to the present study, showing that concentrations above the limit may represent a natural anomaly of the aquifer.

Keywords: natural radionuclides; inorganic chemical characterization; mineral water ; Cambuquira and Marimbeiro Water Parks.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 – Série de decaimento radioativo do ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U	22
Figura 1. 2 – Ciclo Hidrológico da água	24
Figura 1. 3 – Processo de recarga do lençol freático que origina às águas subterrâneas	25
Figura 1.4 - Potencial iônico de alguns elementos.	37
Figura 1.5 – Circuito das Águas de Minas Gerais.	42
Figura 3.1 – Cidade de Cambuquira- Imagem de satélite.	45
Figura 3.2 – Fonte Regina Werneck ou Gasosa com as três saídas de água..	46
Figura 3.3 – Fonte Souza Lima ou Sulforosa	47
Figura 3.4 – Fonte Fernandes Pinheiro ou Férrea	47
Figura 3.5 – Fonte Regina Werneck ou Gasosa	48
Figura 3.6 – Fonte Roxo Rodrigues ou Litinada	48
Figura 3.7 – Fonte Marimbeiro 1,2 e 3.	49
Figura 3.8 – Fonte Laranjal ou Dico.	49
Figura 3.9 – Precipitação final Ba(Ra)SO_4	51
Figura 3.10 – Precipitado Ba(Ra)SO_4 após filtração em papel de microfibras de vidro marca Millipore.	52
Figura 3.11 – Detector proporcional de fluxo gasoso de baixa radiação de fundo Berthold LB770.....	52
Figura 3.12 – Precipitação final PbCrO_4	54
Figura 3.13 – Precipitado PbCrO_4 após filtração em papel de fibra Millipore ..	55
Figura 3.14 – Fluxograma Determinação radioquímica ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb ...	56
Figura 3.15 – Deposição de ^{209}Po e ^{210}Po em disco de cobre sobre agitação .	58
Figura 3.16 – Espectrômetro alfa	58
Figura 3.17 – Fluxograma Determinação radioquímica ^{210}Po	59
Figura 3.18-Geometria de excitação-detecção do EDXRF e TXRF, com linhas contínuas representando os raios X incidentes e espalhados, e o trajeto dos raios X característicos.	62
Figura 3.19- Amostras para detecção por Fluorescência de raios X; e procedimento até contagem das amostras.	63
Figura 4.1 – pH das amostras de águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e da fonte Laranjal ou Dico.	65

Figura 4.2 –. Temperatura ($^{\circ}$ C) das amostras de águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira , Marimbeiro e da fonte Laranjal ou Dico.	65
Figura 4.3 – Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2016.	70
Figura 4.4 –. Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2016.	71
Figura 4.5 –. Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira , Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016.	71
Figura 4.6 –. Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016.	72
Figura 4.7 –. Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira , Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016.	72
Figura 4.8 –. Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016.	73
Figura 4.9 –. Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017.	73
Figura 4.10 – Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017.	74
Figura 4.11 –. Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017.	74
Figura 4.12 – Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017.	75
Figura 4.13 – Razão de concentrações $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico das cinco coletas realizadas.	77
Figura 4.14 – Razão de concentrações $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico das cinco coletas realizadas.	78

Figura 4.15 – Razão de concentrações $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico das cinco coletas realizadas.	79
Para ^{210}Po a maior dose efetiva comprometida para público adulto foi de 0,031 mSv/a para a fonte Férrea, coleta do outono de 2016, para o público adulto o valor de 0,1 mSv/a (WHO, 2006) não foi ultrapassado.	82
Figura 4.16 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po das águas minerais dos parques de Cambuquira no outono de 2016	82
Figura 4.17 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra das águas minerais dos parques de Cambuquira no outono de 2016	84
Figura 4.18 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no inverno de 2016	85
Figura 4.19 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no inverno de 2016	86
Figura 4.20 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro na primavera de 2016	87
Figura 4.21 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro na primavera de 2016	88
Figura 4.22 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no verão de 2017.	88
Figura 4.23 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no verão de 2017.	90
Figura 4.24 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no outono de 2017	90
Figura 4.25 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no outono de 2017.	91
Figura 4.26 – Exemplificação da curva de calibração para o elemento Ca.....	94
Figura 4.27 – Elementos Fe,K Ba e Ca determinados pela técnica EDXRF referente a coleta do outono de 2016.....	97
Figura 4.28 – Elementos Co,V e Mn determinados pela técnica EDXRF referente a coleta do outono de 2016	98
Figura 4.29 – Elementos Fe, K, Ba e Ca determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do inverno de 2016.....	99
Figura 4.30 – Elementos Co, V e Mn determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do inverno de 2016.....	100
Figura 4.31 — Elementos Fe, K, Ba e Ca determinados pela técnica EDXRF referente à coleta da primavera de 2016.....	101

Figura 4.32 – Elementos Co, V e Mn determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do primavera 2016.....	102
Figura 4.33 – Elementos Fe, Ba, K E Ca determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do verão de 2017.....	103
Figura 4.34 – Elementos determinados Co, V e Mn pela técnica EDXRF referente à coleta do verão 2017.....	104
Figura 4.35 – Análise por agrupamento Cluster para os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po	106
Figura 4.36 – Gráfico representativo aos coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do outono de 2016.....	108
Figura 4.37 – Gráfico representativo aos coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do inverno de 2016.	108
Figura 4.38 – Gráfico representativo aos coeficientes de correlação de Pearson para a coleta da primavera de 2016.....	109
Figura 4.39 – Gráfico representativo aos coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do verão de 2017.....	109

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1.1 PARTE I – Elementos químicos, suas funções biológicas e toxicidade relativa para mamíferos.....	35
Tabela 1.1 Parte II– Elementos químicos, suas funções biológicas e toxicidade relativa para mamíferos.....	36
Tabela 4.1 – Dose no osso (H_o), mSv/a, das concentrações de ^{226}Ra das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas nas cinco coletas realizadas nas estações do ano.	80
Tabela 4.2 – Dose do osso (H_o) mSv/a das concentrações de ^{228}Ra das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas nas cinco coletas realizadas nas estações do ano.	81
Tabela 4.3 – Dose do osso (H_o) mSv/a das concentrações de ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas nas cinco coletas realizadas nas estações do ano.	81
Tabela 4.4 – Dose no osso (H_o), mSv/a, das concentrações de ^{210}Po das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas nas cinco coletas realizadas nas estações do ano.	82
Tabela 4.5 – Valor estimado de limite de detecção (ppm ou mg/l), valores reais calculados $\pm$ desvio padrão (ppm); desvio padrão relativo(%) e erro relativo(%).	95
Tabela A.1 - pH e temperatura das amostras de água mineral dos parques das águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico	125
Tabela B.1 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro coletadas no outono de 2016.	126
Tabela B.2 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016.	126
Tabela B.3 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016.	127
Tabela B.4 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017.	127
Tabela B.5 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017.	128

Tabela B.6 – Razões entre $^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$, $^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$ e $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico nas coletas de outono, inverno e primavera de 2016.....	129
Tabela B.7– Razão entre $^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$, $^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$ e $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico nas coletas de verão e outono de 2017.	129
Tabela B.8 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro coletadas no outono de 2016.....	131
Tabela B.9- Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016.....	131
Tabela B.10 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016	133
Tabela B.11 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017	134
Tabela B.12 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017	135
Tabela B.13 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a do radionuclídeo ^{210}Po das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico coletadas outono,inverno de primavera de 2016.	136
Tabela B.14 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a do radionuclídeo ^{210}Po das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão e outono de 2017.	137
Tabela C.1 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta do verão de 2017 em mg/l $\pm$ desvio padrão.....	138
Tabela C.2 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta do inverno de 2016 em mg/l $\pm$ desvio padrão.	139

Tabela C.3 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta da primavera de 2016 em mg/l $\pm$ desvio padrão.....	140
Tabela C.4 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta do outono de 2016 em mg/l $\pm$ desvio padrão.....	141
Tabela C.5 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do Inverno de 2016 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico	142
Tabela C.6 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do outono de 2016 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico	143
Tabela C.7 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta da primavera de 2016 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico	144
Tabela C.8 –Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do verão de 2017 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico	145

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Radioatividade natural.....	19
1.2 Água: Características e Ciclo hidrológico	23
1.3 Hidrogeologia	25
1.4 Água mineral	27
1.4.1 O mercado das águas minerais.....	31
1.5 Elementos químicos presentes nas águas minerais	32
1.5.1 Rádio	32
1.5.2 Chumbo.....	33
1.5.3 Polônio	33
1.5.4 Elementos maiores, menores e traço.....	34
1.6 Estudos que abordam algumas características das águas minerais...	37
1.7 Circuito das Águas de Minas Gerais	41
1.8 Justificativa do trabalho	42
2 OBJETIVO	44
2.1 Objetivos secundários	44
3 PARTE EXPERIMENTAL	45
3.1 Descrição da área de estudo.....	45
3.1.1 Parque das Águas de Cambuquira	46
3.2 Amostragem	49
3.3 Determinação radioquímica dos isótopos ^{226}Ra e ^{228}Ra	50
3.3.1 Determinação concentração de atividade ^{226}Ra	53
3.3.2 Determinação concentração de atividade ^{228}Ra	53
3.4 Determinação radioquímica de ^{210}Pb	54
3.4.1 Determinação concentração de atividade ^{210}Pb	56
3.5 Determinação radioquímica de ^{210}Po	57
3.5.1 Determinação concentração de atividade ^{210}Po	59
3.6 Cálculo da dose efetiva comprometida	60
3.7 Fluorescência de raios X.....	60
3.7.1 Determinação de elementos por Fluorescência de raios X(EDXRF).....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64

4.1 pH e Temperatura	64
4.2 Radionuclídeos naturais	66
4.2.1 Eficiência da contagem alfa total para a medida de ^{226}Ra	66
4.2.2 Eficiência de contagem beta de ^{226}Ra para a medida de ^{228}Ra	66
4.2.3 Eficiência de contagem beta para a medida de ^{228}Ra	67
4.2.4 Eficiência de contagem beta para a medida de ^{210}Pb	67
4.2.5 Eficiência de contagem alfa para a medida de ^{210}Po	68
4.2.6.Determinação dos limites inferiores de detecção para metodologia da determinação de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po	68
4.2.7 Validação do método ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po	69
4.2.8 Concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po	70
4.2.9 Dose no osso (H_o) para os radionuclídeos analisados.	80
4.2.10 Dose efetiva comprometida (H_e) para os radionuclídeos analisados	82
4.3 Elementos maiores, menores e traços analisados por EDXRF.....	93
4.3.1 Calibração curva de concentração EDXRF.....	93
4.3.2 Limite mínimo de detecção do método EDXRF	94
4.3.3 Concentrações dos elementos analisados por EDXRF.....	95
4.4 Análise estatística dos resultados	105
5 CONCLUSÃO	111
6 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	115
APÊNDICE A	125
APÊNDICE B	126
APÊNDICE C	138

1 INTRODUÇÃO

Em diversas estâncias hidrominerais Brasileiras, as fontes de águas minerais radioativas são exploradas, comercializadas e consumidas pela população que acredita que essas proporcionam uma ação benéfica para a saúde.

O circuito das águas de Minas Gerais, localizado ao sul do estado, atualmente composto por 14 municípios, é um atrativo turístico, pois além do poder medicinal de suas águas, os locais também chamados de parques, contam com opções de lazer e balneários.

Em parques das águas como os de Cambuquira e Marimbeiro, ambos localizados em Minas Gerais, podem-se encontrar diversas fontes de águas minerais naturalmente carbogasosas, que são utilizadas para o consumo humano e muitas vezes associadas ao uso medicinal, como águas diuréticas (aumentando o volume do fluxo urinário), águas catárticas (efeito laxativo) e águas com propriedades antiflogísticas (anti-inflamatórias).

Os elementos químicos estáveis, assim como os radioativos, podem ser extraídos e carregados pelas águas subterrâneas, originando águas minerais de diferentes composições químicas, sendo de suma importância compreender a distribuição destes elementos presentes nestas, pois alguns elementos essenciais como (Fe, Cu, Mn, Zn e Co) podem exercer efeitos benéficos a baixas concentrações e podem ser prejudiciais em níveis elevados (MERIAN, et. al., 2004).

Devido à presença de radionuclídeos naturais ou artificiais em toda biosfera terrestre, o homem está exposto às radiações ionizantes, e uma vez que, a principal forma de absorção da radioatividade natural é por meio da dieta humana, a prática do uso dessas águas pode aumentar a probabilidade de ingestão de radionuclídeos naturais que são provenientes das séries

radioativas do urânio e tório e, por conseguinte aumentar a dose de radiação que o indivíduo possa receber (DESIDERI et al., 2007).

1.1 Radioatividade natural

A radioatividade que também pode ser denominada de decaimento radioativo ou transformação nuclear é um processo espontâneo, no qual um núcleo de átomo instável (chamado de núcleo pai) transmuta-se em outro núcleo, que pode ser mais estável ou não que o anterior. Se o núcleo posterior ainda for instável, esse continuará se transmutando até se tornar estável; esse processo origina as séries radioativas (PORDGORSK, 2009).

O ser humano está constantemente exposto a alguma fonte de radiação, que pode ser de origem antropogênica (artificial), ou de origem natural. Sabe-se que grande parte da dose que normalmente é recebida pela população provém da radiação natural, sendo 0,4 mSv/a de raios cósmicos, 0,5 mSv/a de raios gama terrestres, 1,2 mSv/a da inalação e 0,3 mSv/a por ingestão, totalizando 2,4 mSv/a; porém isso não significa que todos os indivíduos recebam necessariamente essa dose (UNSCEAR, 1988, 2000).

A radiação natural muitas vezes é liberada em quantidades traço para o meio ambiente, por meio da ação do vento, intemperismo tanto químico quanto físico, e também pela dissolução de elementos radioativos presentes em rochas e solos. Após o decaimento, estes podem produzir um campo de radiação externa onde todos os seres humanos estão expostos, dessa forma pode-se afirmar que a radiação natural é encontrada em todos os compartimentos do meio ambiente, rocha, solo, água e ar (ISINKAYE e EMELUE, 2015; UNSCEAR, 2000).

A radiação natural também interage com as células do corpo humano, onde a maior parte dos órgãos e tecidos não são afetados, no entanto se a dose dessa radiação for alta, ela pode ser suficiente para matar um grande número de células e acarretar danos para o indivíduo (UNSCEAR, 2000).

O conceito de dose foi introduzido em proteção radiológica a fim de determinar o efeito causado por uma grandeza de radiação ionizante.

A *International Commission On Radiation Units and Measurements* (ICRU) e a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) são instituições responsáveis pela padronização e caracterização da radiação e também responsáveis pela descrição dos efeitos da radiação com a matéria.

Os relatórios da ICRU E ICRP são divididos em grandezas físicas (caracterizam campo de radiação advindo de qualquer ponto), grandezas operacionais (grandezas radiológicas de radioproteção em situações de trabalho) e grandezas de radioproteção (estimam risco biológicos causados pela radiação ionizante), onde estas são inseridas nas grandezas da radioproteção sendo possível calcular a dose equivalente (dose absorvida média em um órgão ou tecido) e a dose efetiva (combinação de doses para diferentes tecidos e órgãos, multiplicado pelo fator de ponderação de cada tecido) (IPEN, 2002).

Vários fatores podem modificar a quantidade da dose recebida por cada pessoa e entre estes está o consumo de água potável. Assim, muitos estudos são realizados para avaliar os possíveis efeitos biológicos na saúde humana quando o indivíduo é exposto a prolongadas baixas doses de radiações ionizantes (UNSCEAR, 1988, 2000).

Quando os radionuclídeos são incorporados, podem permanecer no organismo por meses e anos; para fins de radioproteção pode-se ser calculada a dose efetiva comprometida que é a dose efetiva total integrada a incorporação de um radionuclídeo considerando um intervalo de tempo de 70 anos após o evento da ingestão. (ICRP, 2000; WHO,1993; WHO,2006 apud NEGRÃO, 2012).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) a dose efetiva recomendada abrangendo 1 ano de consumo e utilização de água potável é de 0,1mSv (WHO, 2006); abaixo deste nível de dose não é necessária nenhuma ação para reduzir a radiação na qual o indivíduo é exposto ao consumir água.

No entanto, entre os elementos radioativos, uma característica marcante das águas minerais são as altas concentrações dos radionuclídeos naturais ^{226}Ra e ^{222}Rn originalmente dissolvidos (KOBAL et al., 1979; EISENBUD, 1987).

Deve-se ressaltar, contudo, que em relação às práticas terapêuticas baseadas na ingestão de água, banhos térmicos de imersão e uso de lamas medicinais, os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{210}Po e ^{228}Ra quando presentes, são de importância relevante, pois contribuem em grande parte para a irradiação interna e externa dos indivíduos.

Na natureza encontramos três séries radioativas que são consideradas de origem terrestre, as séries do ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U que podem ser visualizadas na FIG.1.1.

Figura 1.1 – Série de decaimento radioativo do ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U .

Fonte: IAEA, 2014 (modificada).

1.2 Água: Características e Ciclo hidrológico

A água é uma molécula indispensável para a existência de vida. Ela possui propriedades excepcionais, como a função de vector de calor e ainda possui três estados de matéria, bem atípicos em relação a outros materiais naturais. Na sua forma gasosa a água pode ser considerada uma das moléculas mais leves; em estado líquido possui uma densidade alta e em estado sólido, a água é muito mais leve que em sua forma líquida (MARSILY, 1994; LAZZERINI, 2013).

Esta também é considerada um bom solvente, pois sua constante dielétrica é alta (80,1°C a 20°C); essa constante faz que os íons de cargas semelhantes se aproximem da molécula de água antes que as forças Coulombicas repulsivas se tornem mais importante, afastando esses íons. Devido a essa característica ímpar, a água desempenha um imenso papel de transportar e redistribuir os minerais da terra (BREZONIK e ARNOLD, 2011; MARSILY, 1994).

Segundo BREZONIK e ARNOLD (2011) é possível afirmar que cada elemento da Tabela Periódica (pelo menos aqueles com isótopos) pode ser encontrado na água. Entretanto, uma importante particularidade das águas doces é que estas possuem uma identidade dos íons inorgânicos, pois em quase todas as águas são encontrados em maior concentração os íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO^{-3} , SO_2^{-4} e Cl^- ; essa característica pode estar ligada aos sais destes íons serem moderavelmente solúveis, facilitando assim sua mobilização em meio aquoso.

A água é de extrema importância para o homem para a produção de alimentos, pois desde o antigo Egito, todas as atividades tanto domésticas quanto agrícolas eram realizadas perto de rios. A água corrente era usada para a movimentação de máquinas e sua grande utilização a fez ser ideal para solvente universal. Assim, em todo mundo as grandes cidades foram construídas ao redor de grandes cursos d'água (GRASSI, 2001).

Na biota sabe-se que aproximadamente 97,5% da água do planeta está disponível em oceanos e mares, na forma salgada e imprópria para

consumo. Dos 2,5% totais restantes de água doce existente, 2/3 estão armazenados nas geleiras e calotas polares e aproximadamente 0,77% de toda a água disponível para o consumo pode ser encontrada em lagos, rios, água subterrânea e atmosfera (GRASSI, 2001).

As águas doces disponíveis para consumo costumam ter um ciclo de reposição, também chamado de ciclo hidrológico que pode ser visualizado na FIG.1.2.

Figura 1. 2 – Ciclo Hidrológico da água

Fonte: USGS, 2017. In: <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>.

O ciclo hidrológico que permite a circulação das águas ocorre por meio da evaporação, transpiração, precipitação, escoamento superficial, infiltração e escoamento subterrâneo.

A etapa de evaporação ocorre de maneira direta, por meio da transpiração das plantas, dos animais e por sublimação (passagem de água direta da fase sólida para vapor). Esses processos podem ser chamados de evapotranspiração. O vapor de água circula para a atmosfera e condensa-se após percursos muito variáveis; a água condensada origina nevoeiros e nuvens, e por meio deste ocorre a precipitação que pode ser tanto na fase líquida, quanto na fase sólida.

A água precipitada pode ter diversos destinos, uma parte é devolvida novamente para atmosfera, por evaporação, outra parte origina o escoamento

superficial, que origina os cursos de água e o restante infiltra-se constituindo o escoamento subterrâneo. Tanto o escoamento superficial como o escoamento subterrâneo irão alimentar os cursos de água que deságuam nos lagos e nos oceanos (LIMA, 1986).

A hidrologia pode ser compreendida como a ciência que estuda a água, tanto a água superficial quanto a originada da atmosfera e subsolo. Por ser uma vasta área de estudo possui diversas subáreas específicas, como por exemplo, a hidrometeorologia que tem como finalidade o estudo da água na atmosfera; a limnologia que estuda a água de lagos e reservatórios; potamologia estuda a água presente em rios; a oceanografia que estuda os oceanos; hidrogeologia que estuda a ocorrência e processos químicos e físicos das águas subterrâneas e a glaciologia que tem por finalidade o estudo das águas no estado gelo/neve (PAZ, 2004).

1.3 Hidrogeologia

O termo hidrogeologia foi por muito tempo rejeitado por muitos estudiosos. A primeira vez que a palavra foi utilizada para se referir a águas subterrâneas foi em 1802 pelo francês Jean B. Lamarck, porém hoje o termo é aceito universalmente (FEITOSA, 2008).

Define-se por água subterrânea aquela que ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático (FEITOSA, 2008).

Na FIG.1.3 é possível observar todo o processo de recarga do lençol freático dando origem às águas subterrâneas.

Após o processo de escoamento subterrâneo, uma parcela da água pela força de adesão ou capilaridade fica retida em regiões próximas a superfície do solo, essa zona é chamada de não saturada ou zona de aeração ou vadosa. Dentro dessa zona é possível encontrar a zona de umidade do solo localizada na parte mais superficial do solo onde há uma grande perda de água para a atmosfera e serve de suporte para a vida vegetal.

Figura 1. 3 – Processo de recarga do lençol freático que origina as águas subterrâneas

Fonte: Banco Int. de Objetos Educacionais, 2017. In: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br>

Na zona intermediária, que também pode ser chamada de zona da umidade do solo, há uma umidade maior que a citada acima, porém ainda com uma intensa evaporação da água subterrânea. A franja de capilaridade é a região mais próxima do lençol freático onde todos os poros estão preenchidos com água pelo efeito da capilaridade e, entre as zonas não saturada e saturada é encontrado o chamado lençol freático que também pode ser chamado de nível freático, nível d'água ou nível potenciométrico. Durante a infiltração da água uma parte ficará retida na zona não saturada e outra por meio da gravidade atingirá a zona saturada. (IRATANI e EZAKI, 2009; ABAS, 2017).

Na zona saturada, todos os poros existentes entre grãos que dão origem aos solos e rochas estão preenchidos por água. Essa água costuma ter um fluxo contínuo e lento, e um dos parâmetros que influencia no fluxo desta é a permeabilidade; essa propriedade pode variar com a forma, distribuição e tamanho dos grãos do solo de cada região (IRATANI e EZAKI, 2009).

As águas subterrâneas originam os aquíferos, que também podem ser definidos como uma formação geológica que contém quantidades significativas de águas que podem se movimentar de forma natural em seu interior (FEITOSA, 2008).

Esses podem ser classificados conforme as porosidades das rochas dos locais (poroso ou sedimentar, fraturado ou fissural e cárstico), e também

podem ser classificados conforme a pressão da água como aquíferos livres ou confinados (ABAS, 2017).

Um outro estudo das águas subterrâneas e águas minerais é a crenoterapia, que consiste em uma técnica que usa a água como fins curativos, tanto por meio da ingestão, quanto uso externo (balneoterapia) (MOURÃO, 1992).

A crenoterapia começou no Brasil com a colonização portuguesa e por diversos anos foi uma disciplina ministrada na Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG e Universidade Federal do Rio de Janeiro-URFJ (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Atualmente o Ministério da Saúde aprovou uma portaria onde o uso da crenoterapia é reconhecido como um tratamento complementar; essa portaria também engloba o Sistema Único de Saúde - SUS (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

1.4 Água mineral

A água mineral, segundo o Decreto Lei Nº 7.841 de 08.03.1945 é definida como: "Águas minerais são aquelas provenientes de fontes naturais ou artificialmente captadas que possuem composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns com características que lhes confirmam uma ação medicamentosa" (MACEDO, 2007). Além da composição química essas águas podem ser classificadas por outras características físico químicas, tais como temperatura e gases.

As águas minerais também podem ser classificadas quanto a sua composição química segundo o Decreto-Lei n. 7841/45 – Código de Águas Minerais em:

I - Oligominerais, quando, apesar de não atingirem os limites estabelecidos neste artigo, forem classificadas como minerais pelo disposto nos parágrafos 2º e 3º, do art. 1º da presente lei.

II - Radíferas, quando contiverem substâncias radioativas dissolvidas que lhes atribuam radioatividade permanente.

III - Alcalino-bicarbonatadas, as que contiverem, por litro, uma quantidade de compostos alcalinos equivalente, no mínimo, a 0,200 g de bicarbonato de sódio.

IV - Alcalino-terrosas as que contiverem, por litro, uma quantidade de compostos alcalino-terrosos equivalente no mínimo a 0,120 g de carbonato de cálcio, distinguindo-se:

a) alcalino-terrosas cálcicas, as que contiverem, por litro, no mínimo, 0,048 g de cátion Ca, sob a forma do bicarbonato de cálcio;

b) alcalino-terrosas magnesianas, as que contiverem, por litro, no mínimo, 0,030 g de cationte Mg, sob a forma de bicarbonato de magnésio.

V - Sulfatadas, as que contiverem, por litro, no mínimo, 0,100 g do anionte SO combinado aos cationtes Na, K e Mg.

VI - Sulfurosas, as que contiverem, por litro, no mínimo, 0,001 do anionte S.

VII - Nitratadas, as que contiverem, por litro, no mínimo, 0,100 g do anionte NO de origem mineral.

VIII - Cloretadas, as que contiverem, por litro, no mínimo, 0,500 g do Cl Na (cloreto de sódio).

IX - Ferruginosas, as que contiverem, por litro, no mínimo, 0,005 g do cationte Fe.

X - Radioativas, as que contiverem radônio em dissolução, obedecendo aos seguintes limites:

a) *fracamente radioativas, as que apresentarem, no mínimo, um teor em radônio compreendido entre 5 e 10 unidades Mache, por litro, a 20° C e 760 mm de Hg de pressão;*

b) *radioativas, as que apresentarem um teor em radônio compreendido entre 10 e 50 unidades Mache por litro, a 20° C e 760 mm de Hg de pressão;*

c) *fortemente radioativas, as que possuírem um teor em radônio superior a 50 unidades Mache, por litro, a 20° C e 760 mm de Hg de pressão.*

XI - Toriativas, as que possuírem um teor em torônio em dissolução, equivalente em unidades eletrostáticas, a 2 unidades Mache por litro, no mínimo.

XII - Carbogasosas, as que contiverem, por litro, 200 ml de gás carbônico livre dissolvido, a 20° C e 760 mm de Hg de pressão.

§ 1º As águas minerais deverão ser classificadas pelo D.N.P.M. de acordo com o elemento predominante, podendo ter classificação mista as que acusarem na sua composição mais de um elemento digno de nota, bem como as que contiverem iontes ou substâncias raras dignas de nota (águas iodadas, arseniadas, litinadas etc.).

§ 2º As águas das classes VII (nitratadas) e VIII (cloretadas) só serão consideradas minerais quando possuírem uma ação medicamentosa definida, comprovada conforme o § 3º do art. 1º da presente lei (CÓDIGO DAS ÁGUAS MINERAIS, 1945).

Além da composição química as águas podem ser classificadas por outras características físico químicas, tais como temperatura e gases.

A respeito da temperatura MACEDO (2007), define as fontes da seguinte forma: classificadas como fria ($< 25^{\circ}\text{C}$), hipotérmica entre 25°C e 33°C , mesotérmica entre 33°C e 36°C , isotérmica entre 36°C e 38°C e hipertérmicas acima de 38°C .

As águas minerais também podem ser classificadas conforme os sólidos totais de amostra, por meio da quantificação do resíduo seco a 180°C , após evaporação de 1 litro de amostra. As águas são classificadas conforme PETRACCIA et al. (2006) como: águas com muito baixo conteúdo mineral (resíduo seco $< 50\text{ mg/l}$); águas com baixo conteúdo mineral (resíduo seco > 50 e $< 500\text{ mg/l}$); águas com médio conteúdo mineral (resíduo seco > 500 e $< 1500\text{ mg/l}$); e águas ricas em minerais (resíduo seco $> 1500\text{ mg/l}$).

As águas minerais na sua maioria são incolores, porém algumas podem se apresentar turvas, por exemplo, quando as águas possuem ferro, que pode precipitar na forma de bicarbonatos ferruginosos. (MOURÃO, 1992)

De maneira geral as águas, não devem possuir odor, nem sabor, porém águas minerais sulfurosas possuem um odor característico devido à presença do H_2S , mas segundo WHO (1993) o odor só seria sensível ou perceptível acima de $0,8\text{ mg/l}$ de H_2S .

O pH das águas minerais, segundo a resolução da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos- CNNPA de 24/07/1978 pode variar de 4 a 10 (BRASIL, 1978)

Estudos arqueológicos indicam que as águas minerais eram usadas desde os tempos babilônicos como forma de terapia, porém foi a Gália que acabou conhecida como a cidade que iniciou o comércio de águas medicinais, principalmente águas frias. No século XVI o uso das águas se intensificou na Inglaterra, com médicos famosos como Edmund Deane (1632), Edward Jorden (1631) sir John Floyer (1649-1734) que acreditavam na melhora de doenças por meio do uso das águas; em 1634, Ludovic Rowzee fez uma lista de doenças que poderiam ser combatidas com águas minerais (NUNES e TAMURA, 2012).

Apesar do povo indígena sempre usar a água para fins terapêuticos apenas no século XIX que o uso destas ganhou força no Brasil, mais precisamente a partir de 1818, com a criação da primeira estância termal brasileira que deveria ser regida pelos estatutos do Hospital das Caldas da Rainha, localizado em Portugal; desde então o uso de águas termais se intensificou (NUNES e TAMURA, 2012).

1.4.1 O mercado das águas minerais.

Em diversos países como a Alemanha, Bélgica, Itália, Marrocos entre outros, 70% da água que é utilizada pela população em geral é de origem subterrânea (GRAF, 2000).

Houve um aumento significativo no mercado de água mineral no mundo no fim do século XX; um exemplo pode ser observado na França que tinha um consumo de 300 milhões de litros em 1938 e passou para 6 bilhões em 2000 (YAMADA et al., 2007).

O mercado global de vendas as águas minerais envasadas em 2007 superava a casa de US\$ 40 bilhões, e em 2013 segundo a consultoria internacional BMC - Beverage Marketing Corporation estimou que o consumo global de água na forma engarrafada era de 266 bilhões de litros (IDEIES/FINDES, 2015)

Em 2013 o maior consumo de água mineral foi dos países China, Estados Unidos e México, sendo que no mesmo ano a Indonésia passou o Brasil, tornando-se o 4º maior mercado mundial (YAMADA et al., 2007).

Apesar de tradicionalmente as águas minerais serem consumidas diretamente nas fontes, no Brasil a importação e exportação das mesmas vêm ganhando espaço assim como no cenário mundial.

No ano de 1997, a indústria movimentou R\$ 500 milhões com águas minerais e potáveis de mesa; no ano de 2005 a arrecadação foi R\$ 857 milhões, sendo característica das águas brasileiras por regiões: hipotermiais na região Norte e Nordeste, de mesa região Centro-oeste, águas

fracamente radioativas e carbogasosas na região Sudeste e alcalinas bicarbonatadas e terrosas região Sul (YAMADA et al., 2007).

No Brasil, a região Sudeste é responsável pela maior produção de água mineral e de mesa, com 55% da produção, onde os maiores produtores se encontram em São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Na região Nordeste a produção é de 24%, região Sul a produção é de 11%, na região Centro-Oeste é de 5,5% e na região Norte 4,5%. Os maiores exportadores de águas envasadas no são Nestlé com 16,2% mundial e Coca-Cola com 14,2%; o faturamento das empresas anual chegam a 4 bilhões de dólares.(YAMADA et al, 2007)

1.5 Elementos químicos presentes nas águas minerais

1.5.1 Rádio

O rádio (Ra) é um metal alcalino-terroso, com número atômico 88, que não possui isótopos estáveis; foi isolado na sua forma metálica por meio de eletrólise de solução de RaCl_2 em cátodo de mercúrio, pelo casal Curie em 1910. Sais de rádio tendem a ter coloração vermelha–carmim em teste de chama e libera 0,00001 ml de gás radônio (Rn) em condição normal de temperatura e pressão (AFONSO,2009).

Apesar de já terem sido identificados 25 isótopos de rádio, os isótopos naturais de maior interesse e em maior abundância são: ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1600 \text{ a}$) da série natural do ^{238}U , ^{223}Ra ($T_{1/2} = 11,43 \text{ d}$) da série natural do ^{235}U e ^{224}Ra ($T_{1/2} = 3,6 \text{ d}$) e ^{228}Ra ($T_{1/2} = 5,75 \text{ a}$) da série natural do ^{232}Th . O rádio possui comportamento muito semelhante ao bário, não só por pertencerem à mesma família na tabela periódica, mas principalmente pela semelhança de seus raios iônicos, sendo o bário usado como seu análogo químico. (IAEA, 2014; OLIVEIRA,1993)

Nas águas subterrâneas o rádio pode ser carregado pelas águas advindo de rochas, porém a quantidade deste elemento nas águas pode variar por diversos fatores, entre eles operações de mecanismos que renovam o rádio na fonte e mecanismos que extraem o mesmo elemento destas; um exemplo

são os íons SO_4^{-2} e CO_2 , que em altas concentrações podem favorecer a remoção do rádio nas formas de Ba(Ra)SO_4 precipitado e $(\text{MRa})\text{CO}_3$ (REYES, 2009)

Sobre a incorporação deste elemento, os isótopos ^{226}Ra e ^{228}Ra apresentam um comportamento similar ao cálcio; uma grande parte do rádio ingerido é eliminado por meio fecal, porém o restante tende preferencialmente a se depositar nos ossos (EISENBUD, 1987).

1.5.2 Chumbo

O chumbo (Pb) é um elemento químico que possui número atômico 82 e peso atômico 207, é um metal cinzento - prateado, que derrete a $327,5^\circ\text{C}$. O chumbo pode ser considerado um dos elementos pesados mais comuns, pois sua concentração na crosta terrestre é de 13 mg/kg, contudo ele é raramente encontrado na forma metálica. Seu estado de valência em compostos inorgânicos é o bivalente (+2) e a principal distribuição do chumbo é pelo ar, podendo ser transportado, dependendo de sua partícula por longas distâncias. Assim grandes quantidades de chumbo podem ser depositadas tanto no solo quanto em águas, porém devido a sua pouca solubilidade aquática o metal tende a permanecer perto do seu local de deposição. (IPCS, 1995)

Existem quatro isótopos de chumbo que ocorrem nas séries naturais radioativas ^{211}Pb ($T_{1/2} = 36,1 \text{ min}$), ^{212}Pb ($T_{1/2} = 10,6 \text{ h}$) e ^{214}Pb ($T_{1/2} = 26,8 \text{ min}$), porém apenas o ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3 \text{ a}$) possui meia vida relativamente longa em comparação aos seus outros isótopos. A maior parte do ^{210}Pb , quando dentro do corpo humano, tem a afinidade de se depositar no esqueleto (JAWORAWSK, 1969 apud MOREIRA, 1993).

1.5.3 Polônio

O polônio (Po) é um metal cinza prateado; o elemento foi descoberto por Pierre e Marie Curie em 1898 e recebeu essa denominação em homenagem ao país de origem de Marie Curie, a Polônia. O polônio possui pouca abundância terrestre; a concentração de Po em minérios de urânio é

inferior a 0,1 mg/ton, sua abundância na crosta terrestre é de 2×10^{-10} mg/kg e $1,5 \times 10^{-14}$ mg/l nas águas do mar. Devido a alta energia liberada de suas partículas alfa é facilmente identificado por meio da espectrometria alfa. (AFONSO, 2010)

Na natureza é possível encontrar sete isótopos do polônio: ^{216}Po ($T_{1/2} = 0,14$ s) e ^{212}Po ($T_{1/2} = 3 \cdot 10^{-7}$ s) da série do decaimento do ^{232}Th ; ^{215}Po ($T_{1/2} = 1,7 \cdot 10^{-3}$ s) e ^{211}Po ($T_{1/2} = 0,51$ s) da série do decaimento do ^{235}U ; ^{218}Po ($T_{1/2} = 3,1$ min), ^{214}Po ($T_{1/2} = 163$ μs) e ^{210}Po ($T_{1/2} = 138$ d) da série do decaimento do ^{238}U . No entanto apenas o ^{210}Po possui meia vida relativamente longa quando comparada aos seus demais isótopos. (AFONSO, 2010)

Na determinação do polônio, uma propriedade importante do elemento é a capacidade de deposição espontânea em superfícies metálicas, como exemplo, a prata e o cobre em meios ácidos (NIERI NETO, 1996).

As partículas alfa do elemento polônio tem pouco poder de penetração, ocorrendo assim uma maior preocupação deste elemento quando dentro do organismo humano. Segundo NIERI NETO (1996), os órgãos mais críticos na ingestão de ^{210}Po são: rins, baço, fígado, medula (vermelha) e principalmente o osso (superfície).

1.5.4 Elementos maiores, menores e traço

Elementos maiores são elementos químicos que compõe a crosta terrestre cuja sua presença é maior que 1% em massa; elementos menores possuem abundância na crosta entre 0,01% a 1% e elementos traços são metais presentes em baixas concentrações ($< 0,1$ decagrama por quilo) em solos e plantas. (GUILHERME et. al. 2005; KRAUSKOPF e BIRD, 1995 apud DAMATTO, 2010). Entre esses elementos alguns são considerados essenciais para a vida como Ca, Fe, Na, P, Cr, Cu, S, Se, Mg e Mn, porém mesmo os essências em concentrações elevadas podem causar um efeito negativo tanto na saúde humana quanto em ecossistemas terrestres e aquáticos.

Alguns elementos possuem grande importância na saúde humana, pois podem estar ligados a necessidades metabólicas, assim existe uma

grande preocupação com a ingestão adequada de alguns minerais que podem ser disponíveis de forma correta por meio de formas terapêuticas, como o uso da água potável. Na TAB. 1.1 são apresentados alguns destes elementos, suas funções biológicas e toxicidade relativa para os mamíferos.

TABELA 1.1 – Elementos químicos, suas funções biológicas e toxicidade relativa para mamíferos.

Elemento	Função Biológica	Toxicidade Relativa ⁽¹⁾
		Mamíferos
Ag	Nenhuma conhecida	A
Al	Pode ativar a desidrogenase succínica	B
As	Nenhuma conhecida em animais Constituinte de fosfolipídios em algas e fungos	A
B	Constituinte do fosfogluconato	B
Ba	Nenhuma conhecida	A (solúvel)
Be	Nenhuma conhecida	A
Cd	Nenhuma conhecida	A(acumulativo)
Co	Essencial para mamíferos. Co-fator em numerosas enzimas. Importante na fixação simbiótica de N ₂	M
Cr	Parece estar envolvido no metabolismo de açúcares em animal	Cr ⁺⁶ : A Cr ⁺³ : M
Cu	Essencial para todos os organismos. Co-fator em enzimas redox e no transporte de O ₂	M

1) Letras classificam a toxicidade como baixa (B), moderada (M) e alta (A).

PARTE I

TABELA 1.1 – Elementos químicos, suas funções biológicas e toxicidade relativa para mamíferos.

Elemento	Função Biológica	Toxicidade Relativa ⁽¹⁾	
		Mamíferos	
F	Fortalece os dentes em mamíferos	M	
Fe	Essencial para todos os organismos. Co-fator em muitas enzimas e proteínas heme	B	
Hg	Nenhuma conhecida	A(acumulativo)	
Mn	Essencial para todos organismos. Co-fator em muitas enzimas. Envolvido na reação de quebra da água na fotossíntese		
Mo	Essencial para quase todos organismos. Co-fator enzimático na fixação de N ₂ e na redução de NO ₃	M	
Ni	Nenhuma conhecida em mamíferos. Parece ser essencial para plantas. Encontrado na enzima urease.	M	
Pb	Nenhuma Conhecida	A (acumulativo)	
Sb	Nenhuma conhecida	A	
Zn	Essencial para todos organismos. Co-fator em muitas enzimas	BM	

1) Letras classificam a toxicidade como baixa (B), moderada (M) e alta (A).

PARTE II

Fonte: (MCBRIDE, 1994; ATSDR, 2005 apud GUILHERME et. al. 2005). (Modificado).

Outro fator importante sobre os elementos maiores, menores e traços é sua mobilidade no meio aquático após intemperismo; essa mobilidade está ligada a solubilidade de cada elemento, que por fim está ligada a função do seu potencial iônico. O potencial iônico é a relação da carga iônica do elemento e raio iônico ($P = z/r$), onde íons com menor carga e maior força de atração tendem a ser mais móveis em ambientes aquáticos, FIG. 1.4.

FEITOSA (2008) classifica os potenciais iônicos da seguinte forma: elementos que formam íons complexos (B^{+3} , C^{+4} , N^{+5}) com potencial iônico acima de 12; elementos que tendem a sofrer hidrólise e assim tem tendência a concentrar em resíduos insolúveis com potencial iônico entre 3 e 12, e elementos com potencial iônico de 0 a 3 solúveis e portanto móveis.

Figura 1.4 - Potencial iônico de alguns elementos.

Fonte: MASON, 1962 (modificado).

1.6 Estudos que abordam algumas características das águas minerais

Vários estudos demonstram que os elementos estáveis e radioativos da tabela periódica e que possuem isótopos podem ser encontrados na água; assim, muitos trabalhos realizados em águas minerais avaliaram as concentrações dos isótopos de U e Th e dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po e ^{222}Rn .

OLIVEIRA (1993), avaliou as concentrações de ^{226}Ra e de ^{228}Ra em fontes de água mineral do município de Águas da Prata. As concentrações encontradas no estudo foram de até 2106 mBq/l para ^{226}Ra e 23,1 mBq/l para ^{228}Ra . O trabalho também avaliou as doses por ingestão dessas águas com o objetivo de avaliar a importância relativa destes radionuclídeos na dose que o indivíduo possa receber ao ingeri-los, chegando a conclusão que a principal contribuição à exposição à radiação entre os isótopos estudados era devida ao ^{226}Ra .

Moreira (1993), determinou a concentração de ^{210}Pb em doze fontes de água mineral da cidade de Águas da Prata; para o radionuclídeo foram encontradas concentrações na faixa do limite inferior de detecção a 1240 mBq/l. No estudo observou-se que a fonte Vilela era a que requeria maior atenção sob o ponto de proteção radiológica apresentando a maior concentração do radionuclídeo na água e consequentemente a maior dose de radiação.

CAMARGO (1994) determinou isótopos de urânio e tório em águas minerais localizadas em Poços de Caldas e Águas da Prata, regiões consideradas de radiação de fundo elevada no Brasil. As concentrações encontradas variaram de <1,1 mBq /l a 34,7 mBq/l para ^{238}U e <1,6 mBq /l a 176,5 mBq/l para ^{234}U , onde a fonte que apresentou maior concentração foi a denominada Prata Nova; a maior concentração de tório foi de 19,9 mBq/l para o isótopo ^{228}Th .

NIERI NETO (1996), determinou as concentrações dos radionuclídeos ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais de Águas da Prata. Foram observadas concentrações variando de 6 mBq/l a 1378 mBq/l para o ^{210}Pb e de 3 mBq/l a 494 mBq/l para o ^{210}Po . O autor pode observar que as concentrações do ^{210}Pb foram maiores do que as do seu descendente ^{210}Po em quase todas as amostras analisadas, mostrando que a presença de ^{210}Po nestas águas é suportada pelo ^{210}Pb .

Em um estudo realizado por GODOY e colaboradores (2001) em diversas regiões do Brasil, os autores determinaram concentrações para o ^{226}Ra variando de 0,002 Bq/l a 0,22 Bq/l.

SANTOS (2010), avaliou as concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn em oito marcas de águas minerais comercializadas na capital pernambucana; os maiores valores encontrados foram para o radionuclídeo ^{222}Rn cuja as concentrações variam de $5 \pm 0,2$ Bq/l a $373,2 \pm 7,2$ Bq/l, e 71,4% das principais águas minerais comercializadas na cidade de Recife puderam ser classificadas como não radioativas.

NEGRÃO (2012), avaliou as concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas do Parque das Águas de Caxambu, Minas Gerais e Águas de Lindóia, São Paulo. No Balneário de Caxambu, as concentrações variaram de 83 mBq/l a 3.599 mBq/l para ^{226}Ra e de 69 mBq/l a 4.481 mBq/l para ^{228}Ra , o maior valor de concentração para o isótopo ^{226}Ra foi observado nas águas da fonte Venâncio, e a maior concentração de ^{228}Ra foi encontrada na fonte Ernestina Guedes. Em Águas de Lindóia as concentrações variaram de 4,8 mBq/l a 41 mBq/l para ^{226}Ra e de 30 mBq/l a 54 mBq/l para ^{228}Ra ; o maior valor de concentração do isótopo ^{226}Ra foi observado nas águas da fonte engarrafada São Jorge, e a maior concentração de ^{228}Ra foi determinada na fonte Santa Filomena. No estudo foi possível observar concentrações mais elevadas para ^{228}Ra em relação ao ^{226}Ra para as fontes de Águas de Lindóia, SP.

BONOTTO (2014), em estudo realizado no estado de São Paulo e Minas Gerais encontrou uma concentração de atividade de ^{222}Rn no intervalo de 0,02 Bq/l a 112,5 Bq/l.

BONOTTO e OLIVEIRA (2017) avaliaram concentrações de atividade de ^{210}Po e ^{210}Pb em águas subterrâneas de “spas” localizados em São Paulo e Minas Gerais. Foram coletadas águas de 75 pontos de amostragem que são amplamente utilizadas como água potável; os valores médios de concentrações encontradas foram de 0,09 mBq/l a 401,5 mBq/l para ^{210}Po e para ^{210}Pb as concentrações variaram de 0,07 mBq/l a 54,8 mBq/l.

Em outros países também há uma preocupação com a concentração de radionuclídeos naturais dissolvidos nas águas.

Nos Estados Unidos foram analisadas águas minerais de Saratoga, New York, e essas apresentaram concentração de 20 Bq/l para ^{226}Ra , onde observou-se que as elevadas concentrações do radionuclídeo estavam diretamente relacionadas as altas concentrações de elementos alcalinos nas mesmas (KITTO et al., 2005).

DESIDERI et al. (2007) analisou o nível de radioatividade natural em 51 amostras de águas engarrafadas na Itália, analisando as concentrações de ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra e ^{210}Po . Os resultados das concentrações variaram de

10 mBq/l a 52,50 mBq/l para ^{226}Ra ; 0,17 mBq/l a 89,00 mBq/l para ^{238}U ; 0,17 mBq/l a 79,00 mBq/l para ^{234}U , e de 0,04 mBq/l a 21,01 mBq/l para ^{210}Po . As concentrações determinadas para urânio e rádio, que foram as maiores encontradas no estudo, porém abaixo do limite recomendado de 100 mBq/l (WHO, 2004).

A Hungria é famosa pelas suas águas minerais. Em um estudo realizado por JOBBÁGY et al. (2010), que avaliou as concentrações dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{234}U , ^{238}U e ^{210}Po por espectrometria alfa, após separação dos elementos da matriz, foram encontradas concentrações de ^{224}Ra e ^{226}Ra , na maioria das amostras, abaixo de 100 mBq/l; porém em quatro amostras os valores de ^{226}Ra (601 mBq/l) ficaram próximos ao limite húngaro para água potável (630 mBq/l).

ONISHCHENKO et al. (2010), avaliaram as concentrações de ^{226}Ra e ^{222}Rn em águas minerais em regiões de alta influência na Rússia, Sérvia, Eslováquia e Quirguistão; a maior concentração encontrada para ^{226}Ra de $4,1 \pm 0,5$ Bq/l para um “spa” localizado no Cáucaso, Rússia. Já as concentrações de ^{222}Rn atingiram valores de até 540 ± 50 Bq/l.

No Iêmen foram avaliadas as concentrações de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K em águas de rochedos, subterrâneas e águas termais do país. Para as águas termais as maiores concentrações encontradas foram de 3,48 Bq/l, 1,01 Bq/l e 16,05 Bq/l para ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , respectivamente. As concentrações encontradas no estudo em todas as áreas de coleta foram consideradas altas para medidas em águas, pois os resultados mostraram que a dose anual para os radionuclídeos analisados no estudo foi muito superior ao valor recomendado de 0,1 mSv/a, conforme estabelecido pela OMS (EL-MAGEED, 2013).

Sobre as análises físico-químicas em águas MISUND et al. (1999), avaliaram 56 marcas de águas potáveis distribuídas na Europa, onde determinaram aproximadamente 66 elementos químicos diferentes. Observaram que as composições entre as águas não eram homogêneas, e

apresentavam grande variação, muito provavelmente decorrente dos diferentes locais e tipos de aquíferos de cada fonte.

BIRKE et al. (2010) analisaram 908 amostras de águas engarrafadas na Alemanha quanto a concentração de 71 elementos químicos, e entre outros parâmetros, o pH. No estudo 70% das águas analisadas não cumpriram os padrões de água potável alemã e europeia e 42 amostras excederam os limites estabelecidos na Alemanha e Europa para um ou mais dos seguintes elementos: arsênio, nitrato, nitrito, manganês, níquel e bário.

Em 1999 a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais- CRPM fez um mapeamento hidro geológico do Circuito das Águas de Minas Gerais. Neste estudo também foram abordados alguns aspectos físico-químicas das águas, onde nas águas de Cambuquira os principais íons encontrados foram sódio, cálcio e potássio. O estudo também avaliou que as fontes Marimbeiro I, II e III, Férrea e Laranjal ou Dico, apresentavam concentrações significativas de Fe.

BULIA e ENZWEILER (2018), avaliaram as concentrações de alguns elementos em águas minerais comercializadas no Estado de São Paulo, Brasil. Foram avaliados os elementos (As, Al, As, B, Ba, Fe, Ge, Li, Mn, Mo e elementos de terras raras como La). Os valores variam para cada água analisada; os autores dividiram as águas em grupos segundo sistema de aquífero encontrando valores de Ba, por exemplo, de 115 a 324 µg/l para as águas minerais de marca Crystal (Mogi das Cruzes), Cristalina e Petrópoles.

1.7 Circuito das Águas de Minas Gerais

O Circuito das Águas de Minas Gerais é composto por 14 municípios - Baependi, Campanha, Carmo de Minas, Caxambu, Conceição do Rio Verde, Lambari, Liberdade São Lourenço, Soledade de Minas, Cruzília, Dom Viçoso, Passa vinte, Três Corações e Cambuquira. Os atrativos nestas cidades, além das águas, são os lugares históricos e beleza aos arredores. Na FIG.1.5 é apresentado o Circuito das Águas de Minas Gerais.

As cidades dentro do circuito apresentam pontos turísticos bem diferenciados, por exemplo, a cidade de Baependi possui mais de cinquenta cachoeiras, a cidade de Caxambu é considerada o maior potencial hidromineral do mundo; em Conceição do Rio Verde localiza-se o Parque das Águas de Contendas, que possui fontes de águas minerais (gasosa, ferruginosa, alcalina e magnesiana). Na cidade de Lambari é localizado o Parque das Águas de Lambari, com águas alcalinas e gasosas; o Parque das Águas de São Lourenço conta com diversas fontes de águas minerais, cada uma com suas propriedades terapêuticas e medicinais em particular.

Figura 1.5 – Circuito das Águas de Minas Gerais.

Fonte: AMINBRA. In: <http://aminbratest2.blogspot.com.br/>. (modificada)

O presente estudo foi realizado na Cidade de Cambuquira, onde as principais atrações da cidade são os dois parques, o Parque das Águas de Cambuquira, com fontes de água mineral ferruginosa, magnesiana, sulfurosa, gasosa e com lítio, o Parque das Águas de Marimbeiro e o Pico do Piripau, a 1.300 m de altitude, de onde decolam pilotos de parapente e asa-delta (CIRCUITO DAS ÁGUAS, 2018).

1.8 Justificativa do trabalho

As águas dos Parques de Cambuquira e Marimbeiro, Minas Gerais, são consumidas frequentemente pela população local e turistas e muitas vezes seu uso é associada à crenoterapia e balneoterapia, como águas diuréticas e

com propriedades anti-inflamatórias; sabendo que a dieta humana é a principal fonte de absorção da radioatividade natural e de exposição interna do homem, esta prática pode aumentar significativamente a probabilidade de ingestão de altas concentrações de radionuclídeos naturais que estão dissolvidos nas águas, principalmente advindos da séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th . Assim, torna-se de suma importância o desenvolvimento de trabalhos científicos, os quais são escassos na região, principalmente sob o ponto de vista radiológico, que comprovem que o uso destas não acarreta nenhum dano à saúde do indivíduo que as consome. O Laboratório de Radiometria Ambiental do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares desenvolve linhas de pesquisa que estudam a distribuição de vários radionuclídeos naturais em águas destinadas ao consumo humano, tanto as águas de abastecimento público, quanto às originárias de fontes minerais. Desta forma, as medidas dos níveis de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po e ^{228}Ra e elementos estáveis presentes nas águas de Cambuquira e Marimbeiro fornecerão resultados que permitirão trabalhos futuros estimar riscos potenciais da sua utilização em práticas médicas.

2 OBJETIVO

Os objetivos do presente trabalho foram determinar as concentrações de atividade (mBq/l) dos radionuclídeos naturais ^{226}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po da série de decaimento do ^{238}U e ^{228}Ra da série de decaimento do ^{232}Th por separação radioquímica e medida em detector proporcional de fluxo gasoso e espectrometria alfa e os elementos Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Ti e V por fluorescência de raio – X nas águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira e Marimbeiro e de uma fonte localizada em uma propriedade particular, fonte Laranjal ou Dico, localizados na cidade de Cambuquira em Minas Gerais.

2.1 Objetivos secundários

- Realizar as coletas trimestralmente para avaliar a influência da sazonalidade nas concentrações dos radionuclídeos e elementos químicos determinados;
- Determinar os parâmetros físico-químicos pH e temperatura das fontes, a fim de verificar possíveis variações sazonais;
- Avaliar a dose efetiva comprometida devido à ingestão das águas minerais dos parques;
- Elaborar um banco de dados que servirá como ferramenta em relação à presença de radionuclídeos e a caracterização inorgânica das águas dos parques.

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Descrição da área de estudo

Cambuquira, FIG. 3.1, é uma cidade localizada ao sul de Minas Gerais, nas coordenadas 21°51'30" S e 45°17' 28" O. A população da cidade em 2016 foi estimada em 13.040 pessoas em uma área territorial de 246,380 km² (IBGE, 2016). A morfologia da cidade é definida por morros de encostas suaves, onde a rocha predominante é um quartzito micáceo, intemperizado (CPRM, 1999).

A cidade foi outrora uma fazenda de nome Boa Vista que pertencia a três irmãs solteiras; ao falecerem as irmãs, a propriedade passou para mãos de escravos. Com receio de perder o patrimônio, já que o local chamava atenção por conta de suas águas, a Câmara Municipal da cidade de Campanha interveio considerando a área de utilidade pública e o local passou então a se chamar Cambuquira. No ano de 1890, foram iniciados os trabalhos de isolamento das fontes pelo Dr. Americo Werneck e pelo químico Frances Ch.Berthaud (ENCICLOPÉDIA, 1958)

FIGURA 3.1 – Cidade de Cambuquira- Imagem de satélite.

Fonte: Google Maps. (<https://www.google.com.br/maps/place/Parque+das+Aguas>)

3.1.1 Parque das Águas de Cambuquira

O Parque das Águas de Cambuquira está localizado aproximadamente a 914 metros de altitude; dentro do parque é possível encontrar um lago artificial e um balneário, além das fontes de águas minerais distribuídas no parque. O parque possui cinco fontes:

- Regina Werneck ou Gasosa, FIG. 3.2, que possui três saídas de água, as quais no presente trabalho foram numeradas como I, II e III. A ingestão da água desta fonte é indicada nos casos de nefrite aguda ou crônica (parte filtrante do rim inflamada), gastrites, hepatismo e inflamação dos canais biliares, desordem intestinal, dermatoses por intoxicação, eczemas e estimulante da secreção (CAMBUQUIRA, 2017).

Figura 3.2 – Fonte Regina Werneck ou Gasosa com as três saídas de água.

Fonte: Autor da dissertação.

- A fonte Souza Lima ou Sulforosa, FIG. 3.3, cuja água é indicada no tratamento de colite (inflamação que atinge uma ou mais camadas do cólon), gastrite, acidez e estimulante do peristaltismo (contrações que ocorrem nos músculos de certos órgãos ocos) dos intestinos. (CAMBUQUIRA, 2017)

Figura 3.3 – Fonte Souza Lima ou Sulforosa

Fonte: autor da dissertação.

- Fonte Fernandes Pinheiro ou Férrea, FIG.3.4, com água mineral indicada para anemia, caquexias (enfraquecimento, desnutrição), linfatismo (aumento de volume dos gânglios linfático) e astenia (perda ou diminuição da força física). (CAMBUQUIRA, 2017)

Figura 3.4 – Fonte Fernandes Pinheiro ou Férrea

Fonte: autor da dissertação.

- Fonte Augusto Ferreira ou Magnesiana, FIG. 3.5, a água desta fonte é indicada como estimulante da função renal, reumatismo, uricemia (acúmulo de ureia no sangue), litíase (formação de cálculos renais) e colite. (CAMBUQUIRA, 2017)

Figura 3.5 – Fonte Regina Werneck ou Gasosa

Fonte: autor da dissertação.

- Fonte Roxo Rodrigues ou Lítinada, FIG. 3.6, cuja água é indicada para desordem intestinal, dermatoses por intoxicação, eczemas propriedades semelhantes as fontes Gasosa e Magnésiana, além disso é indicada para distúrbios emocionais, sendo utilizada em uma unidade engarrafadora de água mineral da cidade de Cambuquira. (CAMBUQUIRA, 2017)

Figura 3.6 – Fonte Roxo Rodrigues ou Litinada

Fonte: autor da dissertação.

Outra área de estudo do presente trabalho é o Parque das Águas de Marimbeiro localizado a 3 km do centro da cidade de Cambuquira; o local apresenta mais três captações que foram denominadas Marimbeiro 1, 2 e 3. Na FIG. 3.7 é apresentada a fonte Marimbeiro e as captações 1, 2 e 3

Figura 3.7 – Fonte Marimbeiro 1,2 e 3.

Fonte: autor da dissertação.

Ambos os parques são administrados pela CODEMIG (CPRM, 1999).

Também foi coletada água mineral de uma fonte de propriedade particular aberta à população próxima ao parque de Cambuquira e denominada fonte do Laranjal ou Dico, que pode ser observada na FIG.3.8.

Figura 3.8 – Fonte Laranjal ou Dico.

Fonte: autor da dissertação.

3.2 Amostragem

Foram realizadas cinco coletas representativas de cada estação do ano (primavera, verão, outono e inverno), no período de junho de 2016 até maio de 2017. As amostras foram coletadas em galões de polietileno e aciduladas com ácido nítrico 50% até $\text{pH} \leq 2,0$ afim de evitar adsorção dos radionuclídeos no frasco (SMITHSON, 1990). No próprio local em cada fonte foi

avaliada a temperatura (°C) e foram coletados em frascos a parte amostras não aciduladas utilizadas posteriormente para a medição de pH no laboratório.

3.3 Determinação radioquímica dos isótopos ^{226}Ra e ^{228}Ra

A determinação das concentrações de atividade dos isótopos de ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais foram realizadas seguindo a metodologia descrita em detalhes por OLIVEIRA (1993).

Para esse procedimento foi necessário uma pré-concentração das amostras de águas por meio de evaporação de 2 litros para 1 litro; todas as amostras foram analisadas em duplicata.

Em seguida foram adicionados em cada amostra 0,5 ml de carregador de Ba^{2+} (20 mg), 1 ml de carregador de Pb^{2+} (20 mg) e 7 ml de ácido cítrico 2 mol/l. A adição dos carregadores tem como finalidade aumentar a concentração de Ba^{+2} e Pb^{+2} na amostra, ajudando assim no processo de precipitação; o ácido cítrico complexa alguns interferentes como o Fe^{+3} e Al^{+3} que podem precipitar como hidróxidos e interferir no procedimento radioquímico.

Adicionou-se gotas de vermelho de metila e o pH das amostras foi neutralizado com NH_4OH 25% até a viragem do indicador de rosa à amarelo e, por fim adicionou-se à quente 50 ml de H_2SO_4 3 mol/l. Nessa etapa os isótopos de Ra e Pb permanecerão co-precipitados na forma de sulfato de $\text{Ba}(\text{Ra,Pb})\text{SO}_4$.

No dia seguinte, após a decantação do precipitado, o sobrenadante foi retirado e desprezado, o precipitado então foi transferido para um tubo de centrifuga com auxílio de água superpura. Após centrifugação, o sobrenadante foi novamente desprezado e foram adicionados ao precipitado 2,0 g de ácido nitrilotriacético - NTA, água superpura e vermelho de metila; o precipitado foi dissolvido em banho Maria com a adição de 7 ml de NaOH 6 mol/l e reprecipitado pelo ajuste do pH desta solução novamente na faixa de pH 4,5 – 5,0 com ácido acético glacial e 5 mL de uma solução de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 25 mg/ml. Nessa etapa o NTA dissolve o precipitado em meio básico, complexando o

chumbo que permanece em solução e o rádio precipitado na forma de sulfato de bário.

No dia seguinte, a amostra foi novamente centrifugada e o sobrenadante separado para análise de chumbo. O precipitado foi lavado com acetato de amônio 20% e centrifugado, sendo o sobrenadante adicionado ao anterior. Essa lavagem com acetado ajuda a retirar qualquer vestígio de chumbo que possa estar adsorvido ao precipitado. Nessa etapa, o sobrenadante é reservado para a determinação radioquímica do Pb enquanto precipitado é utilizado para a determinação dos isótopos de Ra.

O precipitado de Ba(Ra)SO_4 foi dissolvido com 2,0 g de ácido diaminotetracético, sal dissódico – EDTA, 7 ml de NH_4OH 25% e gotas de vermelho de metila e, depois reprecipitado com ácido acético glacial e 5 ml de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (sulfato de amônio) em banho Maria, FIG.3.9. Nessa etapa é muito importante a viragem do indicador (de amarelo para rosa), pois se o pH estiver muito baixo é possível que haja a dissolução de sulfato de bário e rádio e a formação do ânion hidrogenossulfato, acarretando em perda da qualidade da precipitação (OLIVEIRA, 1998). A amostra foi filtrada a vácuo no dia seguinte com papel de filtro quantitativo de microfibra de vidro, Millipore, FiG. 3.10

Figura 3.9 – Precipitação final Ba(Ra)SO_4

Fonte: autor da dissertação.

Figura 3.10 – Precipitado Ba(Ra)SO₄ após filtração em papel de microfibra de vidro marca Millipore.

Fonte: autor da dissertação.

O rendimento químico das amostras foi determinado gravimetricamente pela pesagem do precipitado formado a partir da adição da solução de carregador de Ba⁺².

As amostras foram secas em estufa, resfriadas em dessecador, pesadas na balança analítica, e medidas em detector proporcional de fluxo gasoso de baixa radiação de fundo, marca Berthold, modelo LB 770 “10 Channel Low-Level Counter”, FIG.3.11, após 21 dias da precipitação final. Esse tempo é necessário para que o ²²⁶Ra não sofra interferência de seus isótopos de meia vida curta ²²⁴Ra e ²²³Ra na medição, pois após este intervalo de tempo as contribuições destes isótopos são praticamente inexistentes e também para que o ²²⁸Ra, entre em equilíbrio com o ²²⁸Ac (OLIVEIRA, 1998).

Figura 3.11 – Detector proporcional de fluxo gasoso de baixa radiação de fundo Berthold LB770

Fonte: autor da dissertação.

3.3.1 Determinação concentração de atividade ^{226}Ra

A concentração de ^{226}Ra foi obtida a partir da expressão (3.1) :

$$A(^{226}\text{Ra}) = \frac{Rn - Bg}{60.RQ.EF\alpha.fabs.[1+k(1-e^{-\lambda t})]}.V \quad (3.1)$$

Em que:

$A(^{226}\text{Ra})$ = concentração de atividade do ^{226}Ra , em mBq/l;

Rn = taxa de contagem alfa total da amostra (cpm);

Bg = taxa de radiação de fundo alfa total (cpm);

RQ = rendimento químico (%);

$EF\alpha$ = eficiência de contagem alfa total, calculada pelo ^{241}Am (cps/dps);

V = volume de amostra em litros (l);

$fabs$ = coeficiente de auto-absorção do ^{226}Ra no precipitado de $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$;

λ = constante de decaimento do $^{222}\text{Rn} = 0,181 \text{ d}^{-1}$;

t = tempo desde a precipitação até a medida (d);

k = constante que leva em conta a diferença entre os coeficientes de auto absorção das 4 partículas alfa que são emitidas no decaimento do ^{226}Ra e que tem as energias: ^{226}Ra (4,8 MeV), ^{222}Rn (5,5 MeV), ^{218}Po (6,0 MeV) e ^{214}Po (7,7 MeV).

A constante k foi calculada pela expressão (3.2). (3.2)

$$k = \frac{fabs(^{222}\text{Rn}) + fabs(^{218}\text{Po}) + fabs(^{214}\text{Po})}{fabs(^{226}\text{Ra})}$$

3.3.2 Determinação concentração de atividade ^{228}Ra

A concentração de ^{228}Ra foi obtida a partir da expressão (3.3):

$$A(^{228}\text{Ra}) = \frac{Rn - Bg}{60.RQ.EF\beta(^{228}\text{Ra}).V} - \frac{EF\beta(^{226}\text{Ra}).A(^{226}\text{Ra})}{EF\beta(^{228}\text{Ra})} \quad (3.3)$$

Em que:

$A(^{228}\text{Ra})$ = concentração de atividade do ^{228}Ra , em mBq/l;

Rn = taxa de contagem beta total obtida (cpm);

Bg = taxa de radiação de fundo beta total (cpm);

RQ = rendimento químico (%);

$EF\beta(^{228}\text{Ra})$ = eficiência de contagem beta total, calculada pela medida de um precipitado padrão de $\text{Ba}(^{228}\text{Ra})\text{SO}_4$ (cps/dps);

$EF\beta(^{226}\text{Ra})$ = eficiência de contagem beta total, calculada pela medida de um precipitado padrão de $\text{Ba}(^{226}\text{Ra})\text{SO}_4$ (cps/dps);

$A(^{226}\text{Ra})$ = concentração de atividade calculada para o ^{226}Ra , em Bq/l;

V = volume de amostra em litros (l).

3.4 Determinação radioquímica de ^{210}Pb

A determinação da atividade do radionuclídeo ^{210}Pb nas águas minerais foi realizada segundo a metodologia descrita em detalhes por MOREIRA (1993).

No sobrenadante reservado obtido da centrifugação do item 3.3 foi adicionado 1ml de Na_2S 1mol/l; nessa etapa o chumbo precipita na forma de sulfeto.

No dia seguinte a amostra foi lavada com água superpura duas vezes e centrifugada. Após a retirada do sobrenadante o sulfeto de chumbo foi dissolvido com ácido nítrico 50%. A solução obtida foi filtrada em papel quantitativo, e o pH da amostra foi ajustado entre 4,5 a 5,0 com acetato de amônio 40%. Aqueceu-se a amostra próximo a ebulição e precipitou-se o Pb com adição de 2,5 ml de Na_2CrO_4 30% ,FIG 3.12.

Figura 3.12 – Precipitação final PbCrO_4

Fonte: autor da dissertação.

A solução contendo o PbCrO_4 assim como a de rádio, foi filtrada a vácuo no dia seguinte, com papel de filtro quantitativo de microfibras de vidro, Millipore, FIG. 3.13.

O rendimento químico do procedimento foi determinado gravimetricamente a partir da massa de carregador de Pb^{+2} adicionado. O ^{210}Pb foi determinado após 10 dias da precipitação, em um detector proporcional de fluxo gasoso de baixa radiação de fundo marca Berthold modelo LB 770 “10 Channel Low-Level Counter”. No fluxograma da FIG 3.14 é apresentado o procedimento radioquímico da determinação dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb .

Figura 3.13 – Precipitado PbCrO_4 após filtração em papel de fibra Millipore.

Fonte: autor da dissertação.

Figura 3.14 – Fluxograma da determinação radioquímica de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb .

Fonte: autor da dissertação.

3.4.1 Determinação concentração de atividade ^{210}Pb

A concentração de atividade de ^{210}Pb foi obtida a partir da expressão (3.4):

$$A(^{210}\text{Pb}) = \frac{R_n - B_g}{60 \cdot R_Q \cdot E \cdot V \cdot (1 - e^{-\lambda t})} \quad (3.4)$$

Em que:

$A(^{210}\text{Pb})$ = concentração de atividade de ^{210}Pb da amostra em mBq/l;

R_n = taxa de contagem total da amostra (cpm);

B_g = taxa de radiação de fundo beta total (cps);

R_Q = rendimento químico (%);

EF_β = eficiência de contagem beta total para o ^{210}Pb (cps/dps);

V = volume da amostra em litros (l);

t = tempo transcorrido entre a precipitação do PbCrO_4 e a contagem em dias;

λ = constante de desintegração do ^{210}Bi ($0,183\text{d}^{-1}$).

3.5 Determinação radioquímica de ^{210}Po

A determinação da atividade do isótopo ^{210}Po nas águas minerais foi adaptado da metodologia descrita por NIERI (1996).

Para esse procedimento foi necessário uma pré-concentração da amostra de água por meio de evaporação de 1 litro até próximo à secura atentando-se a não atingir temperatura acima de 80°C , a fim de evitar perdas, pois o polônio é um elemento volátil acima desta temperatura. Nessa etapa foi adicionada à amostra aproximadamente 0,1ml de traçador de ^{209}Po .

Em seguida, foi necessário alterar o meio em que se encontrava a amostra, para isso levou-se a amostra até a secura e a amostra foi ressuspendida com HCl 6,25 mol/l três vezes e na quarta vez, adicionou-se 2 ml de HCl 2 mol/l.

Avolumou-se a amostra com água superpura até 200 ml, adicionou-se 50 mg de ácido ascórbico e o pH da amostra foi ajustado com NH_4OH 25% a pH entre 1,5 e 2.

Adicionou-se ao béquer uma cela de deposição com um disco de cobre sobre o qual ocorre o fenômeno da deposição espontânea do ^{209}Po e

^{210}Po . Os discos de cobre foram previamente polidos e lavados com água superpura. O processo de deposição espontânea dos radionuclídeos ocorreu após as amostras serem deixadas em agitação constante e aquecimento de 80°C por 4 h, conforme visualizado na FIG 3.15.

Figura 3.15 – Deposição de ^{209}Po e ^{210}Po em disco de cobre sobre agitação

Fonte: autor da dissertação.

Após a deposição o sobrenadante foi descartado e retirou-se o disco de cobre. O disco foi lavado com água superpura e seco em chapa aquecedora a 80°C . Os radionuclídeos foram medidos em um espectrômetro alfa marca Canberra, modelo Alpha Analyst, FIG 3.16. Na FIG 3.17 é apresentado o fluxograma da determinação radioquímica do radionuclídeo ^{210}Po .

Figura 3.16 – Espectrômetro alfa

Figura 3.17 – Fluxograma da determinação radioquímica ^{210}Po .

Fonte: autor da dissertação.

3.5.1 Determinação concentração de atividade ^{210}Po

A concentração de atividade do ^{210}Po foi determinada a partir da expressão (3.5):

$$A(^{210}\text{Po}) = \frac{C_a - C_{BG}}{T \cdot Ef \cdot RQ \cdot V} \cdot 10^3 \quad (3.5)$$

Em que:

$A(^{210}\text{Po})$ = concentração de atividade de ^{210}Po na amostra (mBq/l);

C_a = contagem da amostra no intervalo de interesse;

C_{BG} = contagem do BG;

T = tempo de contagem (s);

Ef = eficiência de detecção (cps . dps);

RQ = rendimento químico;

V = volume da amostra em litros (l).

3.6 Cálculo da dose efetiva comprometida

As doses efetivas comprometidas e dose para osso devido à ingestão das águas minerais contendo os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po foram determinadas a partir da expressão (3.6):

$$H_e = C_n \cdot I \cdot FCD_E \quad (3.6)$$

Em que:

H_e = dose efetiva comprometida (mSv/a);

C_n = concentração de atividade do radionuclídeo n na água (Bq/l);

I = taxa de ingestão de água, em litros por ano (730 l/a) (WHO, 2004);

FCD_e = fator de conversão de dose efetiva comprometida e dose para osso referente a ingestão do radionuclídeo n.

Os respectivos valores dos fatores de conversão de dose por ingestão para os radionuclídeos utilizados nestes cálculos foram retirados do International Commission on Radiological Protection – ICRP (2012). Também foram determinadas as doses para osso, onde os valores utilizados foram $1,30 \times 10^{-5}$ Sv/Bq para ^{226}Ra , $2,50 \times 10^{-5}$ Sv/Bq para ^{228}Ra , $2,20 \times 10^{-5}$ Sv/Bq para ^{210}Pb e $1,6 \times 10^{-6}$ Sv/Bq para ^{210}Po (OLIVEIRA, 1993, MOREIRA, 1993 e NIERI, 1996).

3.7 Fluorescência de raios X

O método de fluorescência de raios X consiste na medida das intensidades dos raios X característicos (raios X secundários) emitidos pelos elementos presentes nas amostras quando devidamente excitadas (BERTIN, 1975). Para a excitação desses elementos, podem-se utilizar equipamentos de raios X, ou uma fonte radioativa emissora de raios gama ou raios X. Após o processo de excitação, as amostras emitirão linhas espectrais com energias características de cada elemento (MORAES, 2004; CUNHA SILVA, NASCIMENTO FILHO e APPOLONI, C. R, 2004).

Ao ser excitado o átomo do elemento presente na amostra tende a ejetar os elétrons dos níveis internos criando um “buraco”, que é rapidamente

preenchido por elétrons dos níveis mais afastados, realizando um salto quântico. A cada transição desses elétrons, ocorre uma perda de energia, que é emitida na forma de um fóton de raios X, que possui uma energia característica do elemento que a emitiu (LEDERER et al., 1967).

Basicamente o método de análise por fluorescência de raios X consiste em três fases: a excitação dos elementos presentes nas amostras, dispersão dos raios X característicos emitidos, e a detecção e medida desses raios X.

A excitação dos elementos presentes nas amostras pode ser feita por partículas aceleradas, como elétrons, prótons ou íons, ou por, raios X e gama, partículas alfa e beta emitidas por radionuclídeos, assim como, raios X gerados por tubos.

A forma mais utilizada para a excitação dos elementos presentes nas amostras é o uso de tubo de raios X tipo Coolidge (OHLWEILER, 1981). O tubo é composto por um invólucro de vidro evacuado, possui um filamento de tungstênio (W) e um ânodo (alvo) de molibdênio (Mo). O filamento ao ser aquecido gera uma nuvem eletrônica pelo efeito termiônico, que será acelerada por diferença de potencial elétrico (ddp) até o ânodo.

Os elétrons acelerados interagem com o material do alvo, transferindo sua energia cinética, onde o resultado dessa interação é a emissão de raios X na forma de um espectro contínuo (MORAES, 2004). No processo, nem toda a energia é convertida em radiação X, parte dela é perdida em forma de calor.

Para realizar a medida das amostras podem ser utilizados dois métodos, um é a dispersão por comprimento de onda (WDXRF), que necessita de instrumentação específica para seleção dos raios X característicos, por meio de um cristal, e o outro método consiste na seleção dos raios X através de pulsos eletrônicos gerados em um detector apropriado, de forma que as amplitudes desses pulsos é diretamente proporcional às energias dos raios X incidente no detector (MORAES, 2004; CUNHA SILVA, NASCIMENTO FILHO e APPOLONI, C. R., 2004).

Os detectores proporcionais a gás e os cintiladores sólidos de NaI (TI) de baixa resolução, são os mais utilizados no WDXRF, onde a separação dos raios X é feita pelo cristal difrator. Já na EDXRF, são utilizados detectores semicondutores de alta resolução (Si (Li), Ge(Li) e Ge hiperpuro), devido a capacidade de separar diretamente dos raios X característicos (MORAES, 2004; CUNHA SILVA, NASCIMENTO FILHO e APPOLONI, C. R, 2004).

Para detecção de raios X de energia entre 1 a 25 keV, são utilizados detectores semicondutores de Si(Li), na EDXRF. Já os detectores de Ge (Li), são utilizados para raios X de alta energia, devido sua maior eficiência de detecção (MORAES, 2004; CUNHA SILVA, NASCIMENTO FILHO e APPOLONI, C. R, 2004).

Figura 3.18-Geometria de excitação-deteção do EDXRF e TXRF, com linhas contínuas representando os raios X incidentes e espalhados, e o trajeto dos raios X característicos.

3.7.1 Determinação de elementos por Fluorescência de raios X(EDXRF).

Foram determinados por fluorescência de raios X os elementos Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Ti e V.

As amostras foram pré-concentradas de 250 ml até 20 ml, em chapa aquecedora. Após a concentração as amostras foram levadas até o Laboratório de amostras Químicas, localizado no Centro de Lasers/ Centro de Química Ambiental (CLA/ CQMA -IPEN). O equipamento utilizado foi o EDX-720 marca Shimadzu, os tubos de raios X são de ródio; a tensão dos elementos Na a Sc é de 15 kV, e para Ti a V é de 50 kV; o resfriamento é feito por nitrogênio líquido.

Condicionou-se 400 µl de amostra no porta amostras de polietileno específico conforme FIG.3.19, e cada amostra foi medida por 40 min em seis ciclos.

Figura 3.19- Amostras para detecção por Fluorescência de raios X; e procedimento até contagem das amostras.

Fonte: Autor da dissertação; SHIMADZU (2018). In: <http://www.shimadzu.com.br/>.

A identificação qualitativa de cada um dos elementos foi estimada através das intensidades dos raios X característicos, curva de calibração (curva de sensibilidade) para cada elemento usando o padrão AccUTrace™ Reference Standard (Catalog No. CLP-ICV-01-R-5) diluídos em diversas concentrações. A curva foi obtida através da relação intensidade medida e intensidade real do padrão em função de cada elemento, utilizando o software do equipamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po foram realizadas em duplicata e os resultados das concentrações estão expressos na forma de média aritmética e desvio padrão.

A fonte Souza Lima (Sulforosa) não foi analisada neste trabalho, por que durante o período de coleta a mesma estava em manutenção. Na coleta do outono de 2016 a fonte do Laranjal ou Dico não foi amostrada. Foram coletadas amostras de água mineral nos dois parques no outono, inverno e primavera de 2016 e no verão e outono de 2017; foi coletada também uma amostra de água potável da cidade em todas as coletas realizadas, a fim de verificar se as águas dos parques possuíam características diferentes da fornecida em abastecimento público.

4.1 pH e Temperatura

Na Figura 4.1 e 4.2 são apresentados os valores de pH e temperatura ($^{\circ}\text{C}$) das amostras coletadas, assim como na forma de tabela no APÊNDICE A. O pH não foi medido nas amostras coletas no outono de 2016.

Os valores de temperatura das fontes variaram de 21°C a 23°C , podendo classificar estas águas como frias (MACEDO, 2007). O pH das fontes variou de 4,35 a 6,80, valores similares aos encontrados em estudo feito em outubro de 1997 pelo Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (CPRM, 1999). Observou-se que os maiores valores de pH foram encontrados na coleta da primavera e os menores na coleta do inverno; para a temperatura, os valores se mantiveram praticamente iguais, indicando uma mínima influência da sazonalidade na temperatura para estas águas minerais.

Para a água potável os valores de pH variaram de 6,68 a 7,06 e a temperatura variou de 16°C a 20°C .

Figura 4.1 – pH das amostras de águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e da fonte Laranjal ou Dico.

Figura 4.2 – Temperatura (°C) das amostras de águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e da fonte Laranjal ou Dico.

4.2 Radionuclídeos naturais

4.2.1 Eficiência da contagem alfa total para a medida de ^{226}Ra

Foi realizada a calibração do detector proporcional de fluxo gasoso de baixa radiação de fundo, conforme OLIVEIRA (1993), utilizando uma fonte eletrodepositada em disco de aço-inox de ^{241}Am . A fonte foi medida três vezes em cada detector por 60 min. A eficiência foi calculada pela expressão (4.1):

$$EF_{\alpha} (^{226}\text{Ra}) = \frac{Rn - Bg}{A_{cor}(^{241}\text{Am}) \cdot 60 \cdot RQ} \quad (4.1)$$

Em que:

$EF_{\alpha} (^{226}\text{Ra})$ = eficiência de contagem alfa para medida de ^{226}Ra , calculada pelo padrão de ^{241}Am (cps/dps);

Rn = taxa de contagem alfa medida do padrão de ^{241}Am (cpm);

Bg = background alfa do detector (cpm);

$A_{cor} (^{241}\text{Am})$ = atividade da fonte de ^{241}Am em Bq;

RQ = rendimento químico do padrão (%).

O valor médio para eficiência alfa total para ^{226}Ra foi de 24,5%.

4.2.2 Eficiência de contagem beta de ^{226}Ra para a medida de ^{228}Ra

A eficiência beta do isótopo ^{226}Ra foi obtida com medidas beta total de amostras de $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$, no qual foi adicionado um padrão de concentração conhecida de ^{226}Ra . Foram feitas cinco amostras com o procedimento radioquímico descrito no item 3.3 e foram medidas no detector proporcional de fluxo gasoso por 200 minutos. A eficiência foi calculada pela expressão (4.2):

$$EF_{\beta} (^{226}\text{Ra}) = \frac{Rn - Bg}{A_{cor}(^{226}\text{Ra}) \cdot 60 \cdot RQ} \quad (4.2)$$

Em que:

$EF_{\beta} (^{226}\text{Ra})$ = eficiência de contagem beta para medida de ^{226}Ra (cps/dps);

Rn = taxa de contagem beta total medida do precipitado de $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$ com padrão de ^{226}Ra (cpm);

Bg = background beta do detector (cpm);

$A_{cor} (^{226}\text{Ra})$ = atividade do padrão de ^{226}Ra em Bq;

RQ = rendimento químico(%).

O valor médio de eficiência beta de ^{226}Ra para a medida de ^{228}Ra foi de 51%.

4.2.3 Eficiência de contagem beta para a medida de ^{228}Ra

A eficiência beta do isótopo ^{228}Ra foi obtida com medidas beta total de amostras de Ba(Ra)SO_4 , no qual foi adicionado um padrão de concentração conhecida de ^{228}Ra . Adicionou-se uma folha de papel filtro sobre o precipitado para impedir a medida de partículas beta de baixa energia. Foram feitas cinco amostras as quais foram medidas no detector proporcional de fluxo gasoso por 200 minutos. A eficiência foi calculada pela expressão (4.3):

$$EF\beta (^{228}\text{Ra}) = \frac{Rn - Bg}{A_{cor}(^{228}\text{Ra}) \cdot 60 \cdot RQ} \quad (4.3)$$

Em que:

$EF\beta (^{228}\text{Ra})$ = eficiência de contagem beta para medida de ^{228}Ra (cps/dps);

Rn = taxa de contagem beta total medida do precipitado de Ba(Ra)SO_4 com padrão de ^{228}Ra (cpm);

Bg = background beta do detector (cpm);

$A_{cor} (^{228}\text{Ra})$ = atividade do padrão de ^{228}Ra corrigida para a data da medida, em Bq;

RQ = rendimento químico(%).

O valor médio para eficiência beta para ^{228}Ra foi de 38%.

4.2.4 Eficiência de contagem beta para a medida de ^{210}Pb

A eficiência beta para o isótopo ^{210}Pb foi obtida com medidas beta total de amostras de PbCrO_4 , no qual foi adicionado um padrão de concentração conhecida de ^{210}Pb . Foram feitas cinco amostras que foram medidas no detector proporcional de fluxo gasoso por 200 minutos. A eficiência foi calculada pela expressão (4.4):

$$EF\beta (^{210}\text{Pb}) = \frac{Rn - Bg}{60 \cdot RQ \cdot A_{cor} \cdot (1 - e^{-\lambda t})} \quad (4.4)$$

Em que:

$EF_{\beta} (^{210}\text{Pb})$ = eficiência de contagem beta para medida de ^{210}Pb (cps/dps);

R_n = taxa de contagem beta total medida do precipitado de PbCrO_4 com concentração padrão de ^{210}Pb (cps);

B_g = background beta do detector (cps);

$A_{\text{cor}} (^{210}\text{Pb})$ = atividade do padrão de ^{210}Pb corrigida em Bq;

RQ = rendimento químico(%);

λ = constante de desintegração do ^{210}Bi ($0,183 \text{ d}^{-1}$);

t = tempo transcorrido entre a precipitação e a medida do PbCrO_4 em dias.

O valor médio de eficiência beta para ^{210}Pb foi de 37%.

4.2.5 Eficiência de contagem alfa para a medida de ^{210}Po

A eficiência do detector foi realizada conforme ALENCAR (2008), onde um fonte eletrodepositada e calibrada de ^{241}Am foi medida por 100 s, três vezes. A eficiência foi calculada pela expressão (4.5):

$$Ef = \frac{C_f}{A_f} \quad (4.5)$$

Em que:

E_f : Eficiência de contagem (cps dps⁻¹);

C_f : Contagem da fonte (cps);

A_f : atividade da fonte (dps).

O valor médio de eficiência alfa para a medida de ^{210}Po foi de 46,7%.

4.2.6.Determinação dos limites inferiores de detecção para metodologia da determinação de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po .

Os limites inferiores de detecção – LID, para os radionuclídeos naturais ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po foram determinados realizando o mesmo o procedimento radioquímico, apresentados nos subtítulos 3.3, 3.4, 3.5 em água superpura. O LID foi calculado conforme a expressão (4.6):

$$LID = \frac{4.66.Sb}{t.RQ.Ef.M} \quad (4.6)$$

Em que:

LID= Limite inferior de detecção (mBq/l);

4,66= Valor tabelado que propõe a existência de um risco pré-determinado de que existe alguma atividade na amostra, podendo existir ou não, com intervalo de confiança de 95%;

Sb: Desvio padrão da radiação de fundo do branco do procedimento.

t= Tempo de contagem (s);

RQ= Rendimento químico do branco;

Ef=Eficiência do sistema de contagem;

M= massa da amostra (l).

Os limites inferiores de detecção são apresentados na TAB. 4.1.

Tabela 4.1- Limite de detecção (LID) para os radionuclídeos analisados em mBq/l.

Radionuclídeo	LID (mBq/l)
^{226}Ra	2,2
^{228}Ra	3,7
^{210}Pb	4,9
^{210}Po	4,2

4.2.7 Validação do método ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po .

O laboratório participa anualmente no Programa Nacional de Intercomparação (PNI), onde as amostras são fornecidas pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria- IRD, localizado no Rio de Janeiro. Este programa tem como objetivo verificar as metodologias estabelecidas em laboratório. Na determinação de rádio e chumbo são oferecidas três amostras no ano, já para o polônio, foi utilizado o PNI de chumbo, esperando o decaimento até equilíbrio entre pai (^{210}Pb) e filho (^{210}Po), aproximadamente cinco meia vidas do ^{210}Po . As amostras de PNI fornecidas foram submetidas pelo mesmo procedimento radioquímico que as amostras de água mineral. Em todas as determinações os resultados foram satisfatórios.

4.2.8 Concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po .

Nas FIG.4.3 a 4.12 são apresentados as concentrações dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po em mBq/l por estação do ano e por fonte referente as cinco coletas realizadas, assim como na forma de tabela no Apêndice B.

Foi possível observar que os radionuclídeos ^{226}Ra e ^{228}Ra apresentaram as maiores concentrações na maioria das amostras em relação ao ^{210}Pb e ^{210}Po , pois os isótopos de Ra, assim como os de U e Rn são os que apresentam maior solubilidade em ambientes aquáticos (COTHERN e REBERS, 1990).

As concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po que apresentaram valores abaixo de LID não foram apresentadas nos gráficos.

Figura 4.3 – Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2016.

Figura 4.4 –. Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2016.

As maiores concentrações encontradas para a coleta do outono de 2016 foram para ^{226}Ra , 216 ± 2 mBq/l referente a fonte Férrea; para ^{228}Ra , 542 ± 52 mBq/l referente a fonte Gasosa I; para ^{210}Pb , 25 ± 4 mBq/l referente a fonte Magnesiana e para ^{210}Po , 36 ± 2 mBq/l também para fonte Férrea.

Figura 4.5 –. Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016.

Figura 4.6 –. Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016.

As maiores concentrações encontradas para a coleta do inverno de 2016 foram para ^{226}Ra , 433 ± 8 mBq/l para fonte Laranjal ou Dico; para ^{228}Ra , 428 ± 65 mBq/l referente a fonte Litinada; para ^{210}Pb , 51 ± 9 mBq/l referente a fonte Laranjal ou Dico e para ^{210}Po , 32 ± 2 mBq/l referente a fonte Férrea.

Figura 4.7 –. Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016.

Figura 4.8 –. Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016.

As maiores concentrações encontradas para a coleta da primavera de 2016 foram para ^{226}Ra , 513 ± 7 mBq/l referente a fonte Laranjal ou Dico; para ^{228}Ra , 587 ± 38 mBq/l referente a fonte Gasosa I; para ^{210}Pb , 60 ± 5 mBq/l e ^{210}Po , $28,8 \pm 0,7$ mBq/l ambas para a fonte Laranjal ou Dico.

Figura 4.9 –. Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017.

Figura 4.10 – Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017.

As maiores concentrações encontradas para a coleta do verão de 2017 foram para ^{226}Ra , 592 ± 30 mBq/l referente a fonte Laranjal ou Dico; para ^{228}Ra , 631 ± 27 mBq/l referente a fonte Gasosa I; para ^{210}Pb , 55 ± 6 mBq/l também para a fonte Laranjal ou Dico e para ^{210}Po $35 \pm 0,9$ mBq/l e $35 \pm 0,5$ mBq/l referente as fontes Férrea e Laranjal ou Dico, respectivamente.

Figura 4.11 – Concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra em mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017.

Figura 4.12 – Concentrações de ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/l, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017.

As maiores concentrações encontradas para a coleta do outono de 2017 foram para ^{226}Ra , 442 ± 32 mBq/l referente a fonte Laranjal ou Dico; para ^{228}Ra , 626 ± 32 mBq/l referente a fonte Gasosa I; para ^{210}Pb , 50 ± 5 mBq/l também para a fonte Laranjal ou Dico e para ^{210}Po 32 ± 2 mBq/l referente a fonte Férrea.

Os resultados apresentaram diferentes concentrações dos radionuclídeos, embora algumas fontes estejam localizadas relativamente próximas umas das outras. Este fato pode ser observado principalmente nas fontes Dr. Fernandes Pinheiro (Férrea) que apresentou valores de ^{226}Ra igual a 216 ± 2 mBq/l e valor abaixo do limite de detecção para ^{228}Ra $<3,7 \pm 0,3$ mBq/l referente a coleta do outono de 2016, e a fonte Roxo Rodrigues (Litinida) que apresentou concentração de 109 ± 15 mBq/l para ^{226}Ra , e 508 ± 17 mBq/l para ^{228}Ra na coleta também realizada no outono de 2016.

A fonte que apresentou maior concentração de ^{226}Ra , 509 ± 32 mBq/l, foi a Laranjal ou Dico na coleta referente ao verão. Para ^{228}Ra a maior concentração também foi obtida na coleta do verão, 631 ± 27 mBq/l, para a fonte Gasosa I. Para o radionuclídeo ^{210}Pb a fonte que apresentou maior concentração em todas as coletas também foi a fonte Laranjal ou Dico com valor de concentração de 60 ± 5 mBq/l referente a coleta da primavera. A água

potável coletada apresentou valores que variaram de 4 ± 1 mBq/l a 6 ± 1 mBq/l para ^{226}Ra , 37 ± 3 mBq/l a 47 ± 7 mBq/l para ^{228}Ra , 9 ± 1 mBq/l a 17 ± 2 mBq/l para ^{210}Pb e valores abaixo do limite de detecção para o ^{210}Po .

Foi possível observar que as concentrações de atividade de ^{226}Ra permaneceram praticamente constantes nas quatro coletas realizadas para todas as fontes, com exceção da fonte Gasosa I que apresentou maior concentração na coleta do outono de 2016, 110 ± 14 mBq/l e menor concentração na coleta do inverno de 2016, 39 ± 3 mBq/l. Para o radionuclídeo ^{228}Ra verificou-se que as maiores concentrações de atividade foram obtidas nas fontes Gasosa I e Litinada no verão de 2017 e as menores no inverno de 2016; para o radionuclídeo ^{210}Pb as maiores concentrações foram obtidas no inverno para as fontes Litinada e Férrea e para o ^{210}Po a maior concentração foi obtida para a coleta do outono de 2016 para a fonte Férrea e na maioria das coletas a fonte Magnesiana apresentou concentrações menores que o limite de detecção.

Os valores encontrados na maioria das fontes para ^{226}Ra e ^{228}Ra são maiores dos que encontrados em um estudo realizado com águas potáveis da Itália, onde as concentrações variaram entre 0,50 a 60,8 mBq/l para ^{226}Ra , com valor máximo de concentração para ^{228}Ra de 25,7 mBq/l (JIA e TORRI, 2007). No entanto ao comparar os valores obtidos no presente trabalho com o estudo realizado por NEGRÃO (2012), onde foram estudadas águas minerais de Caxambu, MG, pode-se observar que as fontes Venâncio, Beleza, D. Isabel e Ernestina deste parque apresentaram valores superiores.

Para ^{210}Pb foi possível observar que os valores encontrados são relativamente mais altos que os valores determinados no estudo de BONOTTO et. al (2009), o qual analisou as águas do Aquífero Guarani. Observou-se também que as concentrações de ^{210}Pb do presente estudo estão dentro do intervalo estabelecido por BONOTTO e OLIVEIRA (2017), que avaliaram ^{210}Pb nas águas minerais de Minas Gerais, e obtiveram uma variação de 0,05 mBq/l a 110,6 mBq/l.

Os valores determinados no presente estudo para ^{210}Po , foram em sua totalidade maiores do que encontrado no estudo de JIA, TORRI e CARLO (2009), que estudaram águas minerais da Itália.

Foi possível observar que os resultados para ^{210}Po estão dentro do intervalo das concentrações encontradas por BONOTTO e OLIVEIRA (2017) que analisaram 46 fontes de água mineral brasileiras e encontraram valores no intervalo de 3,8 mBq/l a 61,7 mBq/l.

Na FIG.4.13 são apresentados os valores de razões $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ e na forma de tabela no APÊNDICE B.

Figura 4.13 – Razão de concentrações $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico das cinco coletas realizadas.

As razões de atividade $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ variaram de 0,40 para a fonte Marimbeiro II referente a estação do inverno a 7,8 para Gasosa I também na estação do inverno. REYES (2009) realizou um levantamento bibliográfico onde observou uma variação entre as razões de $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ de valores abaixo de

0,07 a 41. No estudo feito por NEGRÃO (2012) foi possível observar valores de 0,0079 a 4,2. No presente trabalho observou-se que a maioria das fontes apresentaram valores acima de 1, valores concordantes com a literatura citada anteriormente, pois no Brasil existe uma maior concentração de Th em relação ao U, tanto no solo quanto em rochas, quando não há enriquecimento do urânio por meio secundário (REYES,2009).

Na FIG.4.14 são apresentados e os valores de razões $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Pb}$ e na forma de tabela no APÊNDICE B.

Figura 4.14 – Razão de concentrações $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico das cinco coletas realizadas.

Para razões de $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ observou-se uma variação de 0,045 para a fonte Gasosa I referente a coleta de outono de 2016 a 0,36 para água Magnesiana também na coleta de outono. Segundo BONOTTO e OLIVEIRA (2017), baixos valores de razão para $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ pode indicar um possível esgotamento de ^{210}Pb nas águas quando comparado ao ^{226}Ra , pois como o ^{210}Pb não é tão solúvel como o rádio ele é encontrado na forma partícu-
reativo.

Na FIG.4.15 são apresentados e os valores de razões $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ e na forma de tabela no APÊNDICE B.

Figura 4.15 – Razão de concentrações $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico das cinco coletas realizadas.

Para razões de $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ observou-se uma variação de 0,10 para a fonte Gasosa I referente a coleta de outono de 2017 a 1,5 para fonte Férrea na coleta de outono de 2016. Os resultados estão dentro dos intervalos de concentração encontrados no estudo de BONOTTO e OLIVEIRA (2017), onde as razões do estudo variaram de 0,003 a 434,7. As razões de $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ na maioria dos resultados apresentaram valores abaixo de 1, mostrando que as concentrações do ^{210}Po são menores do que seu radionuclídeo pai; segundo NIERI (1993), isso pode indicar que a presença do ^{210}Po é suportada pelo ^{210}Pb .

As razões de $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ e $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ e $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$, não foram calculadas para a amostra de águas potável, pois ela passa por um tratamento químico, antes de ser distribuída para abastecimento público, e neste os radionuclídeos de interesse podem ser retirados (MOREIRA,1993).

4.2.9 Dose no osso (H_o) para os radionuclídeos analisados.

Nas TAB. 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentados os valores de dose no osso (H_o) das concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po em mSv/a das águas minerais coletadas nos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico nas quatro estações do ano.

Observou-se que as maiores doses para osso foram de 5,62 mSv/a para ^{226}Ra referente a fonte Laranjal ou Dico na coleta do verão de 2017, 11,5 mSv/a para ^{228}Ra referente a fonte Gasosa I na coleta do verão, para ^{210}Pb 0,96 mSv/a também para a fonte Laranjal ou Dico referente a coleta da primavera de 2016 e para ^{210}Po 0,042 mSv/a para a fonte Férrea referente a coleta do outono de 2016. No estudo feito por OLIVEIRA (1993), onde foram estudadas as águas minerais das fontes da cidade de Águas da Prata, algumas fontes apresentaram dose para osso maior do que as encontradas no presente estudo para os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra . Para ^{210}Pb as fontes Vilela I, II e III, também localizadas na cidade de Águas da Prata apresentaram valores bem maiores do que as de Cambuquira, chegando ao valor de 3,9 mSv/a (MOREIRA, 1993). Para ^{210}Po , NIERI NETO (1996) obteve valores de dose para osso muito próximos a do presente estudo.

Tabela 4.1 – Dose no osso (H_o), mSv/a, das concentrações de ^{226}Ra das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas nas cinco coletas realizadas nas estações do ano.

Fontes	Dose Osso H_o ^{226}Ra (mSv/a)				
	Outono 2016	Inverno 2016	Primavera 2016	Verão 2017	Outono 2017
Marimbeiro I	0,82	1,03	0,83	0,82	0,95
Marimbeiro II	0,94	0,88	0,74	0,72	0,86
Marimbeiro III	0,74	0,76	0,67	0,70	0,72
Gasosa I	1,05	0,37	0,94	0,91	0,91
Gasosa II	0,95	0,91	0,46	0,83	0,79
Gasosa III	0,87	0,44	0,82	0,68	0,83
Litinida	1,03	1,04	1,04	1,21	1,19
Férrea	2,05	1,90	1,70	1,98	1,69
Magnesiana	0,64	0,62	0,67	0,67	0,62
Laranjal ou Dico	*	4,11	4,87	5,62	4,19
Água potável Cambuquira	0,04	0,06	0,05	0,05	0,03

*Não amostrado

Tabela 4.2 – Dose do osso (H_o) mSv/a das concentrações de ^{228}Ra das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas nas cinco coletas realizadas nas estações do ano.

Fontes	Dose Osso H_o ^{228}Ra (mSv/a)				
	Outono 2016	Inverno 2016	Primavera 2016	Verão 2017	Outono 2017
Marimbeiro I	0,85	1,00	0,84	0,96	0,98
Marimbeiro II	0,98	0,69	1,57	1,81	1,70
Marimbeiro III	0,72	0,69	1,00	1,28	1,22
Gasosa I	9,90	5,51	11,00	11,50	11,40
Gasosa II	2,41	2,21	3,21	3,18	3,29
Gasosa III	2,87	4,87	2,72	3,25	3,54
Litinida	9,26	7,81	9,11	11,00	9,03
Férrea	-	-	-	-	-
Magnesiana	4,37	5,73	5,71	4,54	6,86
Laranjal ou Dico	*	5,37	6,31	7,19	9,07
Água potável Cambuquira	0,64	0,85	0,68	0,86	0,74

- Não determinado

* Não amostrado

Tabela 4.3 – Dose do osso (H_o) mSv/a das concentrações de ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas nas cinco coletas realizadas nas estações do ano.

Amostra	Dose Osso H_o ^{210}Pb (mSv/a)				
	Outono 2016	Inverno 2016	Primavera 2016	Verão 2016	Outono 2017
Marimbeiro I	0,24	0,30	0,08	0,14	0,11
Marimbeiro II	0,38	0,19	0,14	0,10	0,19
Marimbeiro III	0,24	0,19	0,10	0,20	0,40
Gasosa I	0,08	0,14	0,41	0,28	0,56
Gasosa II	0,18	0,14	0,05	0,25	0,17
Gasosa III	0,17	0,14	0,45	0,24	0,19
Litinida	0,16	0,62	0,35	0,33	0,43
Férrea	0,40	0,69	0,54	0,54	0,69
Magnesiana	0,40	0,38	0,11	0,20	0,17
Laranjal ou Dico	*	0,81	0,96	0,88	0,80
Água potável Cambuquira	0,27	0,14	0,20	0,20	0,20

* Não amostrado

Figura 4.16 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po das águas minerais dos parques de Cambuquira no outono de 2016

Figura 4.17 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra das águas minerais dos parques de Cambuquira no outono de 2016

Figura 4.18 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no inverno de 2016

Figura 4.19 – Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no inverno de 2016

Figura 4.20 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro na primavera de 2016

Figura 4.21 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro na primavera de 2016

Figura 4.22 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no verão de 2017.

Figura 4.23 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no verão de 2017.

Figura 4.24 –Dose efetiva comprometida ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no outono de 2017.

Figura 4.25 –Dose efetiva comprometida ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas minerais dos parques de Cambuquira e Marimbeiro no outono de 2017.

No trabalho também foram calculadas as doses efetivas para indivíduos do público de 5 e 15 anos, pois os fatores de conversão de dose são mais restritivos para essa faixa etária. Observou-se que para o ^{228}Ra a maioria das fontes passou do limite de 0,1 mSv/a, principalmente para 15 anos, Para o ^{226}Ra , algumas fontes ultrapassaram esse valor e para ^{210}Po apenas a fonte Férrea e Laranjal ou Dico para o público de 5 anos ultrapassaram o valor proposto pela WHO (2006). Porém, não é possível afirmar que essas águas são impróprias para consumo, pois o valor limite de dose é sempre conservativo e leva em conta que o ser humano consumiu apenas a água dos Parques de Cambuquira e Marimbeiro, durante 1 ano. Deve-se lembrar também que o valor de 0,1 mSv/a, recomendado pela OMS, representa 4 % da exposição média à radiação natural de fundo de 2,4 mSv/a (UNSCEAR, 2000).

Para o ^{210}Pb foi possível observar que em nenhuma das estações o valor de 0,1 mSv/ foi ultrapassado.

4.3 Elementos maiores, menores e traços analisados por EDXRF

4.3.1 Calibração curva de concentração EDXRF.

Para todos os elementos determinados qualitativamente por EDXRF, Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Ti e V foram construídas curvas de calibração, a partir de leitura de padrões. O padrão AccUTraceTM Reference Standard (Catalog No.CLP-ICV-01-R-5) foi diluído em diversas concentrações e, com o software do equipamento EDX-720 marca Shimadzu, foram obtidas as curvas de calibração conforme FIG. 4.26, para cada elemento determinado usando a expressão (4.7):

$$X = B \cdot Li + C \quad (4.7)$$

Em que:

X= concentração do elemento de interesse na amostra (ppm);

Li= Intensidade da medida da amostra (cps);

C= ponto de corte da curva no eixo Y;

Figura 4.26 – Exemplificação da curva de calibração para o elemento Ca.

4.3.2 Limite mínimo de detecção do método EDXRF.

O limite mínimo de detecção (LMD) do método EDXRF foi estabelecido como o menor valor da curva de calibração usando o padrão de referencia AccUTraceTM Reference Standard (Catalog No.CLP-ICV-01-R-5) e cujo valor apresentou também o menor valor de desvio padrão relativo e erro relativo.

Na TAB.4.5 são apresentados os valores estimados para limite de detecção, valores reais calculados, erro relativo e desvio padrão relativo.

Tabela 4.5 – Valor estimado de limite de detecção (ppm ou mg/l), valores reais calculados $\pm$ desvio padrão (ppm); desvio padrão relativo(%) e erro relativo(%).

Elemento	Limite de detecção	Valor calculado	DPR	ER
As	0,5	0,47 $\pm$ 0,076	15	5
Ba	0,8	0,81 $\pm$ 0,08	1	2
Cd	0,25	0,28 $\pm$ 0,02	17	11
Ca	2,0	2,16 $\pm$ 0,24	12	8
Cr	0,5	0,52 $\pm$ 0,036	7	4
Co	0,2	0,2 $\pm$ 0,041	21	2
Cu	1,25	1,21 $\pm$ 0,066	5	3
Fe	0,5	0,502 $\pm$ 0,02	3	8
Mn	0,06	0,058 $\pm$ 0,01	1	2
Ni	0,16	0,18 $\pm$ 0,023	14	14
K	2,0	1,86 $\pm$ 0,18	9	7
Ag	0,5	0,62 $\pm$ 0,05	11	24
Ti	0,5	0,56 $\pm$ 0,019	4	14
V	0,2	0,22 $\pm$ 0,03	15	10
Se	0,02	0,019 $\pm$ 0,001	5	4

DPR: Desvio padrão relativo

ER: erro relativo.

4.3.3 Concentrações dos elementos analisados por EDXRF

Foram analisados os elementos Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Ti e V pela técnica de fluorescência de raios X das coletas realizadas no outono de 2016, inverno de 2016, primavera de 2016 e verão de 2017.

Os elementos Ag, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Se e Ti apresentaram valores abaixo do limite mínimo de detecção (LMD) estabelecido pela curva de calibração, para todas as fontes em todas as coletas analisadas.

Nas FIG. 4.27 a 4.34 são apresentados os elementos Ba, Ca, Co, Fe, K, Mn e V determinados por EDXRF na forma gráfica e em tabela no APÊNCIDE C.

Apenas para fontes Férrea, Marimbeiro I, II, III e Laranjal ou Dico foram determinadas as concentrações para o elemento Fe, as demais fontes não apresentaram em nenhuma coleta o elemento.

Para o elemento V a concentração média foi de 0,5 mg/l para todas as fontes em todas as coletas analisadas. Os valores encontrados no presente

estudo foram maiores que os de KIMURA et al. (2006) obteve concentração de 0,042 mg/l para um fonte localizada em Ibirá, SP; o estudo visava comprovar que águas que possuem vanádio, podem ser utilizadas em tratamento contra glicemia sanguínea. O estudo avaliou o possível uso de águas para melhora em tratamentos.

Para o elemento Ba a concentração média obtida em todas as fontes e coletas foi de 3,5 mg/l; os valores de bário encontrados no presente trabalho estão acima do estabelecido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA que é de 1mg/l para água potável. GOMES et. al. (2011) avaliaram a concentração de Ba e F em águas subterrâneas do leste da baía de Guanabara, Rio de Janeiro, e obtiveram para o elemento Ba concentrações de até 2,62 mg/l.

Para o elemento Co a concentração média obtida em todas as fontes e coletas foi de 0,48 mg/l; para águas doces os limites de Co estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA são de 0,05 mg/l VM (classes 1 e 2) a 0,2 mg/L VM (classe 3) e a exposição por via oral do elemento cobalto pode causar efeitos gastrintestinais como náusea, vômito e diarreia. Os valores obtidos no presente trabalho foram superiores aos estabelecidos pelo CONAMA, no entanto concentrações acima deste limite podem representar uma anomalia natural do aquífero, pois segundo REGATTIERI, CECCATO e BERTOLO (2011) o elemento Co tem sido encontrado frequentemente acima do padrões brasileiros estabelecidos em aquíferos não contaminados.

Figura 4.27 – Elementos Fe,K Ba e Ca determinados pela técnica EDXRF referente a coleta do outono de 2016.

Figura 4.28 – Elementos Co,V e Mn determinados pela técnica EDXRF referente a coleta do outono de 2016 .

Figura 4.29 – Elementos Fe, K, Ba e Ca determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do inverno de 2016.

Figura 4.30 – Elementos Co, V e Mn determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do inverno de 2016.

Figura 4.31 — Elementos Fe, K, Ba e Ca determinados pela técnica EDXRF referente à coleta da primavera de 2016.

Figura 4.32 – Elementos Co, V e Mn determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do primavera 2016.

Figura 4.33 – Elementos Fe, Ba, K E Ca determinados pela técnica EDXRF referente à coleta do verão de 2017.

Figura 4.34 – Elementos determinados Co, V e Mn pela técnica EDXRF referente à coleta do verão 2017.

Para o elemento Mn a concentração média obtida em todas as fontes e coletas foi de 0,35 mg/l; BULIA e ENZWEILER (2018) avaliaram a concentração de alguns elementos em águas minerais comercializadas no Estado de São Paulo, Brasil, e obtiveram valores de <0,03 µg/l a 785 µg/l para Mn, valores próximos ao do presente estudo.

Para o elemento Ca a concentração média obtida em todas as fontes e coletas foi de 50 mg/L; a fonte que apresentou maior concentração do elemento em todas as coletas realizadas foi a fonte Laranjal ou Dico com concentração de 206 mg/l. RABELO e ARAUJO (1999) analisaram alguns elementos de fontes de águas minerais brasileiras e encontraram valores de concentrações de Ca variando de 0,3 mg/l a 42,1 mg/L.

Para o elemento Fe a concentração média foi de 9,7 mg/l para as fontes Férrica, Marimbeiro I, II, III e para fonte Laranjal ou Dico, sendo que a fonte que apresentou maior concentração do elemento foi novamente a fonte Laranjal ou Dico, com valor de 21,9 mg/l na coleta do verão de 2017. Os valores de Fe determinados no presente trabalho são superiores aos determinados por BOZAU, STARK E STRAUCH (2013) que avaliaram o teor de alguns elementos nas águas termais das montanhas de Harz, na Rússia, cujos valores variaram de 0,86 µg/l a 4600 µg/l.

Para o elemento K a concentração média obtida em todas as fontes e coletas foi de 14 mg/L; a fonte que apresentou maior concentração do elemento foi novamente a fonte Laranjal ou Dico com valor de 33,0 mg/l na coleta do verão de 2017. Os valores obtidos no presente trabalho são da mesma ordem de grandeza dos obtidos por MORGANO et al. (2002) que analisaram algumas águas minerais comercializadas na região de Campinas e obtiveram concentrações médias de K de 32,43 mg/l.

4.4 Análise estatística dos resultados

A estatística multivariada consiste em um conjunto de métodos estatísticos que visam fazer uma análise exploratória dos dados amostrais, a fim de gerar hipóteses que podem auxiliar na correlação desses dados. Apesar de antigamente seu uso ser mais comum em trabalhos de Psicologia e

Biologia, atualmente devido ao avanço tecnológico e aumento de softwares estatísticos ela é usada em outras áreas como Educação, Química, Física, Engenharia, entre outras (MINGOTI, 2013).

No presente trabalho os resultados obtidos foram submetidos a dois métodos estatísticos, a análise de agrupamentos (cluster) e análise de coeficientes de correlação de Pearson utilizando-se o programa livre PAST (Paleontological statistical) versão 3.15.

Foi realizado a análise estatística Cluster para os dados de concentração dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po , a fim de verificar possíveis correlações entre as fontes analisadas no trabalho. A análise estatística Cluster, também conhecida como análise de conglomerados, tem por finalidade a exploração dos dados a fim de formar grupos, de forma que cada elemento presente nos grupos tenha similaridades entre si.

Na FIG. 4.35 são apresentados a análise de agrupamento dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po , com distância euclidiana e método Ward.

Na análise de Cluster foi possível observar a formação de dois grupos, o grupo A que agrupou as fontes Laranjal ou Dico, Gasosa I e Litinada e o grupo B que agrupou as demais fontes.

As fontes agrupadas no grupo A são as que apresentaram maior média de concentrações dos radionuclídeos analisados. A fonte Gasosa I ficou separada da Gasosa II e Gasosa III, comprovando que apesar de pertencerem ao mesmo fontanário, cada saída de água possui características diferentes, e devem ser analisadas separadamente.

As fontes Marimbeiro I, II e III permaneceram agrupadas, dados concludentes ao estudo do CPRM (1999), que as avaliou devido a mesma similaridade da composição química e também, pelos resultados obtidos no presente trabalho, a mesma composição radiológica.

Figura 4.35 – Análise por agrupamento Cluster para os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po .

Foi realizada também a análise de coeficientes de correlação de Pearson para as coletas do outono, inverno e primavera de 2016 e verão de 2017, a fim de verificar correlações existentes entre os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po , pH, temperatura e os elementos Ba, Ca, Co, Fe, Mn, K e V. Essa análise tem por finalidade medir o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. Trata-se de um índice com valores variando de 1 a -1 que reflete o grau de relação entre as variáveis; o valor mais próximo de 1 mostra que as relações são diretamente proporcionais, valores próximos de 0 indicam relação não linear e valores negativos mais próximos de -1 indicam relação inversamente proporcional.

Para essa análise é necessário que os dados estejam normalmente distribuídos, assim todos os resultados foram ajustados por meio de transformação logarítmica a fim de se tornarem normais. (FIGUEIREDO FILHO e SILVA JÚNIOR, 2009). Foram utilizados os valores de limite de detecção para as amostras que apresentaram valores de LID para os radionuclídeos

^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po , e os valores de LMD para os elementos Ba, Ca, Co, Fe, Mn, K e V, para garantia de maior número de dados estatísticos.

Nas FIG. 4.36 a 4.39 são apresentadas as correlações encontradas em forma gráfica e no APÊNDICE C na forma de tabela.

Figura 4.36 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do outono de 2016.

Figura 4.37 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do inverno de 2016.

Figura 4.38 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta da primavera de 2016.

Figura 4.39 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do verão de 2017.

Para as correlações fracas, moderadas e fortes foram adotados valores para os coeficientes de correlação de Pearson do estudo feito por RIBEIRO et. al. (2016) onde valores de 0,10 a 0,49, fracos a moderados, e 0,50 e 1, fortes, negativos ou positivos.

Foi possível notar que na maioria das coletas os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po , que são da mesma família de decaimento radioativo (^{238}U) apresentaram fortes correlações, sendo as maiores encontradas na coleta do verão de 2017 de 0,864 para correlação ^{226}Ra e ^{210}Pb e 0,914 para correlação entre ^{226}Ra e ^{210}Po .

O ^{226}Ra apresentou correlação positiva com o seu análogo químico o Ba sendo que a maior correlação pode ser observada na coleta do inverno de 2016.

O ^{228}Ra apresentou correlação negativa com quase todos os parâmetros analisados.

O elemento ^{210}Po apresentou correlações positivas com o elemento ferro na maioria das coletas realizadas; em meio alcalino o Fe^{3+} pode ser utilizado como carregador de polônio. (NIERI NETO, 1996)

Os elementos químicos apresentaram correlações na maioria dos casos positivas entre si, no entanto é possível notar que o elemento Co na maioria das coletas apresentou correlação inversamente proporcional com o elemento Ba. Em estudo realizado por BEZERRA (2011) foram observadas baixas correlações entre esses elementos em rochas.

Os metais Ca e K tiveram fortes correlações positivas e a maior correlação pode ser observada na coleta do inverno de 2016 com valor de 0,981. Essa correlação já era esperada uma vez que uma característica importante das águas potáveis é que eles têm uma identidade dos íons inorgânicos, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^- . Esta característica pode estar associada aos sais destes íons que são moderadamente solúveis, facilitando assim sua mobilização em meio aquoso.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho determinou as concentrações de atividade (mBq/l) dos radionuclídeos naturais ^{226}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po da série de decaimento do ^{238}U e ^{228}Ra da série de decaimento do ^{232}Th e as concentrações dos elementos (mg/l) Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Ti e V por fluorescência de raio – X nas águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira e Marimbeiro e de uma fonte localizada em uma propriedade particular, fonte Laranjal ou Dico, localizados na cidade de Cambuquira em Minas Gerais.

Foram realizadas cinco coletas trimestrais em um período de 15 meses para se avaliar uma possível influência da sazonalidade nas concentrações dos radionuclídeos e elementos químicos determinados. Também foram medidos o pH e a temperatura das águas das fontes e avaliou-se a dose efetiva comprometida devido à ingestão das águas minerais dos parques.

Os valores de pH e temperatura medidos em todas as águas minerais apresentaram pequenas variações de uma coleta para outra, indicando uma mínima influência da sazonalidade nos valores determinados.

A fonte que apresentou maior concentração de atividade para ^{226}Ra foi a Laranjal ou Dico, 509 ± 32 mBq/l na coleta referente ao verão de 2017. Para ^{228}Ra a maior concentração de atividade também foi obtida na coleta do verão de 2017, 631 ± 27 mBq/l, porém para a fonte Gasosa I. Para o radionuclídeo ^{210}Pb a fonte que apresentou maior concentração de atividade em todas as coletas também foi a fonte Laranjal ou Dico com valor de 60 ± 4 mBq/l referente a coleta da primavera de 2016 e para o ^{210}Po a maior concentração de atividade foi obtida para a coleta do outono de 2016 na fonte Férrea com valor de 36 ± 2 mBq/l.

Observou-se que para a maioria das fontes as razões de atividade $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ apresentaram valores acima de 1, valores concordantes com a literatura, pois no Brasil o Th é encontrado em maiores concentrações, quando comparado ao U.

Foram determinados valores < 1 de razão para $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ podendo indicar um possível esgotamento de ^{210}Pb nas águas em relação ao ^{226}Ra , devido à menor solubilidade do ^{210}Pb em comparação aos isótopos de Ra.

Para razões de $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ a maioria dos resultados apresentaram valores < 1 , indicando provavelmente que a presença do ^{210}Po é suportada diretamente pelo radionuclídeo pai, ^{210}Pb .

Para a dose efetiva comprometida, as maiores doses obtidas para o público adulto foram de $1,21 \times 10^{-1}$ mSv/a para ^{226}Ra referente a fonte Laranjal ou Dico na coleta do verão de 2017; $3,18 \times 10^{-1}$ mSv/a para ^{228}Ra referente a fonte Gasosa I também na coleta do verão de 2017; para ^{210}Pb $3,02 \times 10^{-2}$ mSv/a referente a fonte Laranjal ou Dico na primavera de 2016 e $3,15 \times 10^{-2}$ mSv/a para ^{210}Po referente a fonte Férrea no outono de 2016. Para ^{228}Ra foi possível observar que para o público adulto as fontes Gasosa I, Litinada, Magnesiana e Laranjal ou Dico ultrapassaram o valor de 0,1 mSv/a do WHO (2006) e na maioria das coletas para o público adulto o radionuclídeo ^{226}Ra . Para os radionuclídeos ^{210}Pb e ^{210}Po observou-se que para o público adulto nenhuma fonte ultrapassou o valor de 0,1 mSv/a.

Pela técnica de fluorescência de raios X foram determinados os elementos (mg/l) As, Ba, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, K, Ag, Se, Ti, V para as coletas realizadas no outono de 2016, inverno de 2016, primavera de 2016 e verão de 2017, onde os elementos As, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Ag e Ti apresentaram valores abaixo do limite mínimo de detecção (LMD) estabelecido pela curva de calibração, para todas as fontes em todas as coletas analisadas.

Alguns elementos como Ba e Co, que podem ser considerados contaminantes nas águas minerais, apresentaram valores maiores do que estabelecido pela ANVISA e CONAMA, respectivamente; no entanto trabalhos brasileiros de outras localidades apresentaram valores semelhantes,

mostrando que concentrações acima dos limites estabelecidos podem representar uma anomalia natural do aquífero.

Nas águas minerais dos parques Cambuquira e Marimbeiro foram determinados os elementos Ca e K, elementos normalmente determinados em águas minerais por serem característicos de águas frescas e pela identidade de íons inorgânicos que estas possuem, devido à presença de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^- . Esta característica pode ser ligada aos sais destes íons que são moderadamente solúveis, facilitando sua mobilização em meio aquoso.

Realizando a análise estatística dos dados foi possível observar alguns comportamentos das fontes, como exemplo pela análise de Cluster foi possível observar que a fonte Gasosa I ficou separada da Gasosa II e Gasosa III para os radionuclídeos analisados, comprovando que apesar de pertencerem ao mesmo fontanário, cada saída de água possui características diferentes, e devem ser analisadas separadamente. As fontes Marimbeiro I, II e III permaneceram no mesmo grupo, mostrando similaridades entre elas. Na análise de correlação foi possível observar que os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po apresentaram fortes correlações, isso era esperado pois estes radionuclídeos pertencem a mesma família de decaimento (^{238}U).

Os elementos químicos determinados apresentaram correlações, na maioria dos casos, positivas entre si; no entanto foi possível notar que o elemento Co na maioria das coletas apresentou correlação inversamente proporcional com o elemento Ba.

Os resultados apresentados no presente trabalho contribuíram para o estabelecimento de um banco de dados quanto à presença de radionuclídeos naturais, elementos químicos inorgânicos, pH e temperatura, assim como das doses equivalentes comprometidas devido a ingestão das águas minerais da cidade de Cambuquira, MG.

6 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.

Este trabalho teve como objetivo determinar as concentrações de atividade (mBq/L) dos radionuclídeos naturais ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po nas águas minerais do Parque das Águas de Cambuquira e Parque das Águas de Marimbeiro, ambos localizados em Minas Gerais, ao longo de 15 meses e em coletas trimestrais e avaliar a dose efetiva comprometida devido a ingestão destas águas contendo estes radionuclídeos. Também foi determinado nas amostras as concentrações de alguns elementos presentes nas águas por meio da técnica de fluorescência de raios X. Sugere-se para trabalhos futuros um estudo geológico e geoquímico analisando o solo e as rochas da região dos parques estudados a fim de verificar a procedência das concentrações dos radionuclídeos e elementos químicos determinados em cada fonte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Associação Brasileira de águas subterrâneas. **Águas subterrâneas o que são?** . Disponível em: < <http://www.abas.org/educacao.php>>. Acesso em: Nov. 2017

AFONSO, C. J. Rádio. **Química nova na escola**. V. 32, n.1, p.58-59, 2010. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc32_1/12-EQ-4909.pdf>. Acesso em: Fev. 2017.

AFONSO, C. J. Polônio. **Química nova na escola**. V. 33, n.2, p.129-130, 2010. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc33_2/09-EQ0910.pdf>. Acesso em: Mar.2017.

ALENCAR, M.M; **Determinações de isótopos de uranio e tório em amostras de líquens *carnoparmelia texana***. São Paulo, 59 p. 2008. Dissertação (mestrado em Ciências). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

AMINBRA.**Circuito Turístico das Águas de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://aminbrateste2.blogspot.com/2014/02/circuito-turistico-das-aguas.html>>. Acesso em: Set. 2017.

Banco Int. de Objetos Educacionais. Disponível em: <<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br>>. Acesso em : Out. 2017

BERTIN, E.P. **Principles and practices of X-ray spectrometric analysis**. London: Plenum Press, p.1079,1975.

BEZERRA, J.D. **Quantificação de arsênio, zinco, cobalto, cromo e bário no solo de uma área agriculturável do agreste de Pernambuco**. 2011.76p. Dissertação (Mestrado em tecnologia Nuclear). Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Pernambuco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/9642/arquivo7032_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: Jan. 2018.

BIRKE, M; RAUCH,U; HARAZIM,B; LORENZ,H; GLATTE,W. **Major and trace elements in German bottled water, their regional distribution, and accordance with national and international standards**. Journal of Geochemical Exploration. V. 107, Issue. 3, p. 245-271. 2010.

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

BONOTTO, D.M.; CAPRIOGLIO, L.; BUENO, T.O.; LAZARINDO, J.R. Dissolved ^{210}Po and ^{210}Pb in Guarani aquifer groundwater, Brazil. **Radiation Measurements**. V. 44, p. 311-324. 2009

BONOTTO, D. M.; OLIVEIRA, A. M. M. A. Mobility indices and doses from ^{210}Po and ^{210}Pb activity concentrations data in Brazilian spas groundwaters. **Journal of Environmental Radioactivity**. V. 172, p.15-23. 2017.

BOZAU, E; STARK, H.J; STRAUCH, G. **Hydrogeochemical characteristics of spring water in the Harz Mountains, Germany**. Chemie der Erde - Geochemistry. V. 73, Issue 3, p. 283-292. 2013.

BRASIL. Resolução CNNPA No. 12 de 24/07/1978. Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos. Aprova normas técnicas especiais relativas a alimentos (e bebidas) em todo território Brasileiro.

BREZONIK, P.L.; ARNOLD, W.A. **Water Chemistry: An Introduction to the Chemistry of Natural and Engineered Aquatic Systems**. Oxford University Press, Inc.; 809 p. 2011.

BULIA, I. L. ; ENZWEILER, J. **The hydrogeochemistry of bottled mineral water in São Paulo state, Brazil**. Journal of Geochemical Exploration. **V.188**, p. 43-54. 2018.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Estudos geoambientais das fontes hidrominerais de Cambuquira, Caxambu, Conceição do Rio Verde, Lambari e São Lourenço**. Belo Horizonte. Projeto Circuito das Águas do Estado de Minas Gerais. 1999.

CAMARGO, I. M. C. **Determinação da concentração dos isótopos naturais de urânio e tório em amostras de água**. 1994. 93 p. Dissertação (mestrado em Ciências). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/lara%20Maria%20Carneiro%20de%20Camargo_M.pdf>. Acesso em Fev. 2017.

CIRCUITO DAS ÁGUAS. Disponível em: <<https://circuitodasaguasmg.com.br/#circuito>>. Acesso em: Jan. 2018

CÓDIGO DE ÁGUAS MINERAIS. L. Nº 7.841 de 8 de agosto de 1945. Capítulo VIII. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/439991.pdf>>. Acesso em: Fev. 2017.

COTHERN, C. R.; REBERS, P. **Radon, Radium and Uranium in Drinking Waters**. 285 p. Lewis Publishers, INC, 1990.

CUNHA E SILVA, R. M.; NASCIMENTO FILHO, V. F.; APPOLONI, C. R.; **Fluorescência de raios x por dispersão em energia**. LFNTEC – Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear aplicada, v. 08, n.01, 2004.

DAMATTO, S.R. **Radionuclídeos naturais das séries do ^{238}U e ^{232}Th , elementos traço e maiores determinados em perfis de sedimento da Baixada Santista para avaliação de áreas impactadas**. 2010. 254 p. Tese (Doutorado em Ciências) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

DESIDERI, D.; MELI, M.A.; FEDUZI, L.; ROSELLI, C.; RONGONI, A.; SAETTA, D. ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{210}Po concentrations of bottled mineral waters in Italy and their dose contribution. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 94, p. 86-97, 2007.

Enciclopédia dos Municípios Brasileiros. Volume XXIV. 1958. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/dtbs/minasgerais/cambuquira.pdf>>. Acesso em: Abril 2017.

EISENBUD, M. **Environmental radioactivity**. Academic Press, Orlando, 1987.

EL-MAGEED, A. I. A.; EL-KAMEL, A. E.; ABBADA, A. E.; HARB, S.; SALEH, I. I. Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen, 2013. **Desalination** .V. 321, p.28-3115. 2013.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM ; Recife: LABHID, p. 812 .2008.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, 2009. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/viewFile/3852/3156>>. Acesso em: Out.2017.

GRASSI, M.T. Águas do planeta terra. **Química nova na escola**. Edição especial, p. 31-40. 2001. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/01/aguas.pdf>>. Acesso em: Fev. 2016.

GRAF, A. C. B. Água, bem mais precioso do milênio: o papel dos Estados. **Revista CEJ**. N.12, p. 30-39, 2000. Disponível em: <<http://egov.ufsc.br/portal/sites/default/files/anexos/31308-34977-1-PB.pdf>>. Acesso em: Out. 2017.

GODOY, J. M. AMARAL, E. C. S. A, GODOY, M. L. D. P. Natural radionuclides in Brazilian mineral water and consequent doses to the population. **Journal of Environmental Radioactivity**. V. 53, p 175-182, 2001.

GUILHERME, L. R. G.;M, J. J.; PIERANGELI, M. A. P.;ZULIANI, D. Q. ; CAMPOS, M. L. ;MARCHI, G. **Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos**. Tópicos Ci. Solo, p.345-390, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Maria_Aparecida_Pierangeli/publication/230683147_ELEMENTOS-TRACO_EM_SOLOS_E_SISTEMAS_AQUATICOS/links/0912f502e8a6f5d21d00000/ELEMENTOS-TRACO-EM-SOLOS-E-SISTEMAS-AQUATICOS.pdf>. Acesso em: Mar. 2016.

IAEA (International Atomic Energy Agency), **The environmental behaviour of radium**. Vienna. 267 p. 2014. Disponível em: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs476_web.pdf>. Acesso em: Abril 2016.

ICRP- **Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60**. ICRP Publication 119, v. 41, p.130. 2012. Disponível em: <[http://www.icrp.org/docs/P%20119%20JAICRP%2041\(s\)%20Compendium%20of%20Dose%20Coefficients%20based%20on%20ICRP%20Publication%2060.pdf](http://www.icrp.org/docs/P%20119%20JAICRP%2041(s)%20Compendium%20of%20Dose%20Coefficients%20based%20on%20ICRP%20Publication%2060.pdf)>. Acesso em: Maio 2017.

IDEIES; FINDES. **Análise de Competitividade da Indústria de Água Mineral do Estado do Espírito Santo**, p.26, 2015. Disponível em: <<http://www.invistanoes.es.gov.br/images/contratos-de-competitividade/analise2016/agua.pdf>>. Acesso em: Out.2017.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de dados Cambuquira. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=311070>>. Acesso em: Abril 2017.

IPEN- INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Noções básicas de proteção radiológica**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, p. 57, 2002.

ISINKAYE, M. O.; EMELUE, H. U. Natural radioactivity measurements and evaluation of radiological hazards in sediment of Oguta Lake, South East Nigeria. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 8, p. 459 – 469 2015.

IRATANI, A. M; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**, Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, p.104, 2009. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/cart_AG_SB.pdf>. Acesso em: Fev. 2017.

IPCS. **Inorganic lead**. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety . Environmental Health Criteria 165. 1995. Disponível em : <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc165.htm>>. Acesso em: Out. 2016.

GOMES, O.V.O.; AIRES, J.R.; MARQUES, E. D.; SILVA-FILHO, E.V. **Bário e Flúor Dissolvidos nas Águas Subterrâneas do Leste da Baía da Guanabara – RJ**. XIII congresso Brasileiro de Geoquímica. 9-14 out. 2011, p.1061-1064, Gramado. Anais de Congresso. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/1013/1/Evento_CGQ03T26.pdf>. Acesso em: Maio 2016.

JIA, G.; TORRI, G. Estimation of radiation doses to members of the public in Italy from intakes of some important naturally occurring radionuclides (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra and ^{210}Po) in drinking water. **Applied Radiation and Isotopes**. V. 65 . p. 849–857, 2007

JIA, G.; TORRI, G.; MAGRO, L. Concentrations of ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb and ^{212}Pb in drinking water in Italy: reconciling safety standards based on measurements of gross α and β . **National Institute of Environmental Protection and Research**. P.941–949, 2009.

JOBÁGY, V.; KÁVÁSI, N.; SOMLAI, J.; MÁTÉ, B.; KOVÁCS, T. Radiochemical characterization of spring waters in Balaton Upland, Hungary, estimation of radiation dose to members of public. **Microchemical Journal** .V. 94, Issue 2, p. 159-165, 2010.

KITTO, M.E.; PAREKH, P.P.; TORRES, M.A.; SCHNEIDER, D. Radionuclide and chemical concentrations in mineral waters at Saratoga Springs, New York. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 80, p. 327–339, 2005.

KIMURA, C.B; REIS, C. R.; FERNANDES, L.C. Efeito do consumo de água rica em sais de vanádio sobre a glicemia de ratos diabéticos, **Estud. Biol.**, v. 28, n. 65, p. 87-96, 2006 .

KOBAL, L.; KRISTAN, J.; ANCIK, M.; JERANCIC, S.; SKOFLJANEC, M. **Radioactivity of thermal and mineral springs in Slovenia**. Health Physics 37(August): 239-242p. 1979.

LAZZERINI, F.T. **Fonte hidrominerais do Brasil: componentes biologicamente ativos (BAC)naturais**.2011.388p.Tese(doutorado em Geologia) Universidade Estadual Paulista- UNESP, Rio Claro.

LEDERER, C.M.; HOLLANDER, J.M.; PERLMAN, I. **Table of isotopes**. 6.ed. New York: John Wiley, p.594 ,1967.

LIMA, W.P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba; ESALQ/USP, p. 242, 1986.

MACÊDO, J. A. B. **Águas & águas**. Belo Horizonte – MG: CRQ-MG. 2007

MASON, B. **Principles of Geochemistry**. New York, John Wiley & Sons, p.329, 1962.

MARSILY, G. **A água**. Lisboa: Piaget, 1994

MERIAN, E.; ANKE, M.; IHNAT, M.; STOEPLER, M. **Elements and their Compounds in the Environment**. 2nd Edition, p.1703. 2004

MINISTÉRIO DA SAÚDE. PORTARIA Nº 971, DE 03 DE MAIO DE 2006. LEGISLAÇÃO DO SUS. DISPONÍVEL EM:<http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2006/prt0971_03_05_2006.html 2006>. ACESSO EM: MAIO 2017.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora da UFMG; 2013.

MISUND, A.; FRENGSTAD B.; SIEWERS, U.; REIMANN, C. Variation of 66 elements in European bottled mineral waters. **The Science of the Total Environment**, v. 243/244, p. 21-41, 1999.

MORAES, L. M. B. **Utilização de duas variantes da fluorescência de raios X (EDXRF e TXRF) na determinação de chumbo em águas e sedimentos.** Centro de Energia Nuclear na agricultura. Universidade de São Paulo. Piracicaba, Brasil, 2004.

MOREIRA, S. R. D. **Determinação de ^{210}Pb em águas minerais da cidade de Águas da Prata.** 1993. 62p. Dissertação (Mestrado em tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/051/26051877.pdf>. Acesso em :Fev 2016.

MORGANO, M. A.; SCHATTI, A. C.; ENRIQUES, H. A.; MANTOVANI, D. M. B. Avaliação físico-química de águas minerais comercializadas na região de Campinas, SP. **Ciênc. Tecnol. Aliment**, v.22, n.3 p.239-243, 2002. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612002000300007> Acesso em: Out.2016.

MOURÃO,B.M. **Medicina Hidrológica: Moderna terapêutica das águas minerais e estâncias de cura.** PRIMA promotora de informações Ltda, Poços de Caldas/MG/BRA, p. 733, 1992.

NEGRÃO, S. G. **Determinação dos isótopos naturais de rádio de meias-vidas longas, ^{226}Ra e ^{228}Ra , em águas minerais utilizadas nos Balneários de Caxambu (MG) e águas de Lindóia (SP).** 2012. 74p. Dissertação (Mestrado em tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas - IPEN, São Paulo.Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-03042012-083738/pt-br.php>>. Acesso em: Jan. 2016.

NIERI NETO, A. **Determinação de ^{210}Pb e ^{210}Po em águas minerais radioativas.** 1996. 94p. Dissertação (mestrado em tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas –IPEN, São Paulo.

NUNES, S.; TAMURA, B. M. **Revisão histórica das águas termais.** Trabalho realizado na clínica privada dos autores – São Paulo (SP), Brasil, comunicação pessoal, 2012.

OHLWEILER, O.A. **Fundamentos de analyses instrumental**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e científicos, p.486, 1981.

OLIVEIRA, J. **Determinação de ^{226}Ra e ^{228}Ra em águas minerais da região de Águas da Prata**. 1993. 82p. Dissertação (Mestrado em tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em : < http://pelicano.ipen.br/posg30/textocompleto/joselene%20de%20oliveira_m.pdf >. Acesso em : Fev.2016.

OLIVEIRA, J. **Determinação dos níveis de radioatividade natural em águas utilizadas para abastecimento público no estado de São Paulo**. 1998. V. 1. 141p. Tese (doutorado em tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas – IPEN, São Paulo. Disponível em: < http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Joselene%20de%20Oliveira_D.pdf >. Acesso em: Março 2017.

ONISHCHENKO, A.; ZHUKOVSKY, M.; VESELINOVIC, N.; ZUNIC, Z. S. Radium-226 concentration in spring water sampled in high radon regions. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 68, Issues 4–5, p. 825-827 ,2010.

PAZ, A.R. **Hidrologia aplicada**. Disciplina Ministrada na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, p.138, 2004. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf>.Acesso em : Out.2017.

PETRACCIA, L.; LIBERATI, G.; MASCIULLO, S.G.; GRASSI, M.; FRAIOLI, A. Water, mineral waters and health. **Clinical Nutrition**, vol. 25, p. 377–385, 2006.

PORDGORSK, E.B. **Radiation physics for medical physicists**. Springer. Berlin Heidelberg, 2007. Disponível em: < <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications> >. Acesso em Out.2017.

REBELO, M. A. P.; ARAUJO, N. C. Águas minerais de algumas fontes naturais brasileiras. **Rev. Ass. Med. Brasil**, p. 60-255,1999. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/ramb/v45n3/1658.pdf> > .Acesso em: Nov.2016.

REGATTIERI, S. M.; CECCATO, M.; BERTOLO, R. A. **Cobalto em Águas Subterrâneas: poluição, anomalia geoquímica, erro analítico ou padrão ambiental restritivo?**. II CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO. Anais de Congresso. Disponível em:< <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28166/18290> > Acesso em: Out.2017.

REYES, E. **Comportamento dos radioisótopos ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra e da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em águas subterrâneas extraídas de corpos graníticos fraturados da Suíte Intrusiva de Itu (SP)**. 2009. 205p. Tese (Doutorado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br/pos/geofisica/portugues/dissertacoestestes/comportamento-dos-radiois%C3%B3topos-238u-234u-226ra-228ra-e-da-ra>>. Acesso em: Fev.2016.

SANTOS, F. P. C. **Radionuclídeos naturais em águas minerais comercializadas na cidade de Recife –PE**. 2010. 60p. Dissertação (Mestrado em tecnologia Nuclear). Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Pernambuco. Disponível nem: <http://repositorio.ufpe.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/9266/arquivo2670_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 7 de maio de 2017.

SMITHSON, G. **Sampling and selection of analytical methods for radium**. In: *IAEA (International Atomic Energy Agency), (Ed.), The environmental behavior of Radium*. IAEA-TECHNICAL REPORTS SERIES - 310, 257 - 271 p., 1990.

SOUZA, L. S. **Parque das águas de caxambu – MG: propriedades físico-químicas, aspectos hidrominerais e turísticos**. 2014. 76p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geologia). Universidade Federal de Alfenas. Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.unifal-mg.edu.br/geografia/sites/default/files/Parque%20das%20%C3%81guas%20de%20Caxambu.%20-%20corrigido.pdf>>. Acesso em: Março 2016.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation . “Sources and effects of ionizing radiation. Sources”, Vol. 1, United Nations, New York, 2000.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising Radiation. United Nations, New York. 1988.

USGS, **The water cycle**. Disponível em: <<https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Modificado. Acesso em: Out. 2017

WHO - World Health Organization. **Guidelines for Drinking Water Quality, Recommendation**, 3rd edition, including the first addendum Vol. 1, Geneva, 2006.

WHO - World Health Organization. **Guidelines for Drinking Water Quality**, third ed Geneva, 2004.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). **Guidelines for Drinking water Quality - 13:Inorganic constituents and physical parameters**. Geneva/SUI. 190 p. 1993.

YAMADA, M. P. A.; FIEGEL, I. C.; CORRÊA, Q. B.; HIGASKINO, C. E. K. **Água mineral**. Dossiê Técnico, p.22. 2007. Disponível em:
<<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/Mjlz> > Acesso em : Dez. 2016.

Apêndice A

Neste apêndice são apresentados em forma de tabelas os resultados de:

- Temperatura(° C) e pH das amostras coletadas do parque das águas de Cambuquira , Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico.

Tabela A.1 - pH e temperatura das amostras de água mineral dos parques das águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico

Fontes	Outono		Inverno		Primavera		Verão		Outono	
	2016		2016		2016		2017		2017	
	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)
Marimbeiro I	-	21	5,79	21	6,13	21	5,80	21	5,80	21
Marimbeiro II	-	21	5,63	21	5,93	21	5,90	21	5,91	21
Marimbeiro III	-	21	5,58	21	5,68	21	5,79	21	5,78	21
Augusto Ferreira-Magnesian	-	22	4,47	22	4,53	22	4,50	21	4,49	22
Dr. Fernandes Pinheiro- Férra	-	21	5,64	22	5,24	22	5,33	22	5,25	21
Roxo Rodrigues- Lítinida	-	22	4,70	22	5,00	23	4,72	21	5,00	23
Gasosa I	-	22	4,35	21	4,60	23	4,70	23	4,39	22
Gasosa II	-	22	4,43	22	4,67	23	4,80	23	4,90	22
Gasosa III	-	22	4,67	22	5,02	23	5,48	23	4,92	22
Laranjal ou Dico	-	*	6,01	22	6,80	21	6,14	22	6,05	20
Água potável Cambuquira	-	16	6,98	17	6,68	19	7,06	20	7,01	20

- não determinado

* não amostrado

Apêndice B

Neste apêndice são apresentados em forma de tabelas os resultados de:

- Concentrações em mBq/L dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po $\pm$ desvio padrão.
- Razões $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$, $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Pb}$ e $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$.
- Dose efetiva comprometida dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po $\pm$ desvio padrão.

Tabela B.1 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro coletadas no outono de 2016.

Fontes	Concentração (mBq/ L)			
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po
Marimbeiro I	87 $\pm$ 8	55 $\pm$ 4	15 $\pm$ 1	9,9 $\pm$ 0,37
Marimbeiro II	100 $\pm$ 9	54 $\pm$ 4	12 $\pm$ 1	6,8 $\pm$ 0,27
Marimbeiro III	79 $\pm$ 1	40 $\pm$ 2	15 $\pm$ 1	6,8 $\pm$ 0,24
Gasosa I	110 $\pm$ 14	542 $\pm$ 52	5 $\pm$ 1	4,6 $\pm$ 0,13
Gasosa II	100 $\pm$ 11	132 $\pm$ 30	11 $\pm$ 2	5,8 $\pm$ 0,6
Gasosa III	92 $\pm$ 1	157 $\pm$ 5	11 $\pm$ 1	6,46 $\pm$ 0,16
Roxo Rodrigues- Litinida	109 $\pm$ 15	508 $\pm$ 17	10 $\pm$ 2	10,65 $\pm$ 0,33
Dr. Fernandes P.- Férrea	216 $\pm$ 2	< LID	24 $\pm$ 4	36 $\pm$ 2
Augusto Ferreira-Magnesian	68 $\pm$ 2	239 $\pm$ 8	25 $\pm$ 4	<LID
Água potável Cambuquira	4 $\pm$ 1	35 $\pm$ 1	17 $\pm$ 2	<LID

LID (Limite inferior de detecção): ^{226}Ra = 2,2 mBq/L ; ^{228}Ra = 3,7 mBq/L , 4,9 mBq/L ^{210}Pb e ^{210}Po = 4,2 mBq/L.

Tabela B.2 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016.

Fontes	Concentração (mBq/ L)			
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po
Marimbeiro I	109 $\pm$ 11	55 $\pm$ 4	19 $\pm$ 1	<LID
Marimbeiro II	93 $\pm$ 8	38 $\pm$ 3	12 $\pm$ 1	4,7 $\pm$ 0,7
Marimbeiro III	80 $\pm$ 4	38 $\pm$ 1	12 $\pm$ 2	9 $\pm$ 1,3
Gasosa I	39 $\pm$ 3	302 $\pm$ 2	9 $\pm$ 1	6 $\pm$ 1
Gasosa II	96 $\pm$ 2	121 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1	5,4 $\pm$ 0,6
Gasosa III	47 $\pm$ 5	267 $\pm$ 19	9 $\pm$ 1	<LID
Roxo Rodrigues- Litinida	110 $\pm$ 15	428 $\pm$ 65	39 $\pm$ 5	10 $\pm$ 1,5
Dr. Fernandes P.- Férrea	200 $\pm$ 16	< LID	43 $\pm$ 1	32 $\pm$ 2
Augusto Ferreira Magnesian	66 $\pm$ 8	314 $\pm$ 22	24 $\pm$ 3	5,9 $\pm$ 0,9
Laranjal ou Dico	433 $\pm$ 8	294 $\pm$ 21	51 $\pm$ 9	10 $\pm$ 1
Água potável Cambuquira	6 $\pm$ 1	47 $\pm$ 7	9 $\pm$ 1	<LID

LID (Limite inferior de detecção): ^{226}Ra = 2,2 mBq/L ; ^{228}Ra = 3,7 mBq/L , 4,9 mBq/L ^{210}Pb e ^{210}Po = 4,2 mBq/L.

Tabela B.3 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016.

Fontes	Concentração (mBq/ L)			
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po
Marimbeiro I	88 ± 7	46 ± 9	5 ± 1	7,8± 0,4
Marimbeiro II	78 ± 1	86 ± 12	9 ± 1	7,94 ± 0,18
Marimbeiro III	71 ± 7	55 ± 8	6 ± 1	9,07 ± 0,17
Gasosa I	100 ± 9	587 ± 38	26 ± 1	8,06± 0,26
Gasosa II	49± 7	176 ± 13	5 ± 1	<LID
Gasosa III	87 ± 5	149 ± 16	28 ± 2	<LID
Roxo Rodrigues- Litinida	110± 14	499 ± 47	22 ± 4	11,6 ± 0,57
Dr. Fernandes P.- Férrea	179 ± 7	< LID	34 ± 3	26 ± 0,3
Augusto Ferreira Magnésiana	71± 6	313 ± 10	7 ± 1	<LID
Laranjal ou Dico	513± 7	346± 17	60 ± 5	28,8 ± 0,7
Água potável Cambuquira	5 ± 1	37 ± 1	13 ± 1	<LID

LID (Limite inferior de detecção): ^{226}Ra = 2,2 mBq/L ; ^{228}Ra = 3,7 mBq/L , 4,9 mBq/L ^{210}Pb e ^{210}Po = 4,2 mBq/L.

Tabela B.4 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017.

Fontes	Concentração (mBq/ L)			
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po
Marimbeiro I	87 ± 8	53 ± 6	9 ± 1	5,9± 0,7
Marimbeiro II	76 ± 8	99 ± 15	6 ± 1	5,28 ± 0,6
Marimbeiro III	74 ± 4	70 ± 3	13 ± 1	5,74 ± 0,8
Gasosa I	96 ± 3	631 ± 27	18 ± 2	7,1 ± 0,6
Gasosa II	88 ± 4	174 ± 16	16 ± 1	<LID
Gasosa III	72 ± 6	178 ± 9	15 ± 2	<LID
Roxo Rodrigues- Litinida	127± 15	600 ± 42	21 ± 4	11,6 ± 0,57
Dr. Fernandes P.- Férrea	209 ± 21	< LID	34 ± 4	35 ± 0,9
Augusto Ferreira Magnésiana	71± 4	249 ± 4	13 ± 1	<LID
Laranjal ou Dico	592± 30	394± 28	55 ± 6	35 ± 0,54
Água potável Cambuquira	5 ± 1	47 ± 7	13 ± 1	<LID

LID (Limite inferior de detecção): ^{226}Ra = 2,2 mBq/L ; ^{228}Ra = 3,7 mBq/L , 4,9 mBq/L ^{210}Pb e ^{210}Po = 4,2 mBq/L.

Tabela B.5 - Concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po mBq/L, das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017.

Fontes	Concentração (mBq/ L)			
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po
Marimbeiro I	101 ± 5	56 ± 4	7 ± 1	9 ± 0,4
Marimbeiro II	91 ± 5	99 ± 15	12 ± 2	8 ± 0,27
Marimbeiro III	76 ± 5	67 ± 5	25 ± 2	7 ± 0,3
Gasosa I	96 ± 5	626 ± 32	35 ± 3	5 ± 0,2
Gasosa II	84 ± 5	180 ± 16	11 ± 1	5,8 ± 0,2
Gasosa III	88 ± 4	194 ± 14	12 ± 2	7 ± 0,19
Roxo Rodrigues- Litinida	125 ± 11	495 ± 33	27 ± 2	11 ± 0,4
Dr. Fernandes P.- Férra	178 ± 22	< LID	43 ± 1	32 ± 2
Augusto Ferreira Magnesianana	66 ± 5	376 ± 35	11 ± 1	<LID
Laranjal ou Dico	442 ± 32	497 ± 11	50 ± 5	30 ± 0,6
Água potável Cambuquira	< LID	41 ± 1	13 ± 1	<LID

*LID (Limite inferior de detecção): ^{226}Ra = 2,2 mBq/L ; ^{228}Ra = 3,7 mBq/L , 4,9 mBq/L ^{210}Pb e ^{210}Po = 4,2 mBq/L.

Tabela B.6 – Razões entre $^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$, $^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$ e $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico nas coletas de outono, inverno e primavera de 2016.

Amostra	Outono 2016			Inverno 2016			Primavera 2016		
	$^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$	$^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$	$^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$
Marimbeiro I	0,54	0,17	0,66	0,50	0,17	-	0,52	0,05	1,5
Marimbeiro II	0,54	0,12	0,56	0,40	0,12	0,39	1,10	0,11	0,88
Marimbeiro III	0,51	0,18	0,45	0,48	0,15	0,75	0,77	0,08	1,5
Gasosa I	4,91	0,045	0,92	7,8	0,23	0,66	5,87	0,26	0,3
Gasosa II	1,32	0,11	0,52	1,27	0,09	0,6	3,59	0,06	-
Gasosa III	1,71	0,11	0,58	5,8	0,19	-	0,47	0,32	-
Litinida	4,66	0,09	1	3,9	0,35	0,25	4,53	0,2	0,5
Férrea	-	0,11	1,5	-	0,21	0,74	-	0,18	0,76
Magnesiana	3,54	0,36	-	4,75	0,36	0,24	4,40	0,09	-
Laranjal ou Dico	*	*	*	0,67	0,11	0,19	0,67	0,11	0,48
Água potável Cambuquira	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Não amostrado.....- Não determinado

Tabela B.7– Razão entre $^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$, $^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$ e $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$ das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico nas coletas de verão e outono de 2017.

Amostra	Verão 2017			Outono 2017		
	$^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$	$^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra} / ^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$
Marimbeiro I	0,60	0,10	0,65	0,55	0,06	1,28
Marimbeiro II	1,30	0,07	0,88	1,08	0,13	0,66
Marimbeiro III	0,95	0,17	0,44	0,88	0,32	0,28
Gasosa I	6,57	0,18	0,39	6,5	0,36	0,14
Gasosa II	1,97	0,18	*	2,14	0,13	0,52
Gasosa III	2,47	0,20	*	2,20	0,13	0,58
Litinida	4,72	0,16	0,55	3,96	0,21	0,40
Férrea	*	0,16	1,02	*	0,24	0,74
Magnesiana	3,50	0,18	*	5,69	0,16	*
Laranjal ou Dico	0,66	0,09	0,63	1,12	0,11	0,6
Água potável Cambuquira	-	-	-	-	-	-

* Não amostrado.....- Não determinado

Tabela B.8 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira e Marimbeiro coletadas no outono de 2016

Amostra	Dose efetiva H_e ^{226}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{228}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{210}Pb (mSv/a)		
	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto
Marimbeiro I	$3,9 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-3}$
Marimbeiro II	$4,5 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$2,72 \times 10^{-2}$	$3,8 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$
Marimbeiro III	$3,5 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$9,9 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-3}$
Gasosa I	$5,0 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-2}$	1,35	2,10	$2,7 \times 10^{-1}$	$8,0 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$
Gasosa II	$4,5 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$3,27 \times 10^{-1}$	$5,1 \times 10^{-1}$	$6,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$5,7 \times 10^{-3}$
Gasosa III	$4,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-1}$	$6,1 \times 10^{-1}$	$7,9 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$5,5 \times 10^{-3}$
Litinida	$4,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-2}$	1,26	1,96	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-3}$
Férrea	$9,7 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$4,4 \times 10^{-2}$	-	-	-	$4,0 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$
Magnesiana	$3,0 \times 10^{-2}$	$7,4 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-1}$	$9,2 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$4,0 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$
Água potável Cambuquira	$1,8 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$8,1 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$8,5 \times 10^{-3}$

- Não determinado

Tabela B.9- Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no inverno de 2016

Amostra	Dose efetiva H_e ^{226}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{228}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{210}Pb (mSv/a)		
	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto
Marimbeiro I	$4,9 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-3}$
Marimbeiro II	$4,2 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$9,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-3}$
Marimbeiro III	$3,6 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$9,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-3}$
Gasosa I	$1,7 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-3}$	$7,5 \times 10^{-1}$	1,17	$1,5 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Gasosa II	$4,3 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$	$6,0 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Gasosa III	$2,1 \times 10^{-2}$	$5,1 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$6,6 \times 10^{-1}$	1,03	$1,3 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Litinida	$4,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-2}$	1,06	1,66	$2,1 \times 10^{-1}$	$6,2 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-3}$
Férrea	$9,0 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$4,0 \times 10^{-2}$	-	-	-	$6,9 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$
Magnesiana	$2,9 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-1}$	1,21	$1,5 \times 10^{-1}$	$3,8 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-2}$	$1,21 \times 10^{-2}$
Laranjal ou Dico	$1,9 \times 10^{-1}$	$4,7 \times 10^{-1}$	$8,8 \times 10^{-2}$	$7,3 \times 10^{-1}$	1,14	$1,4 \times 10^{-1}$	$8,1 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$
Água potável Cambuquira	$2,7 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$

- Não determinado

Tabela B.10 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas na primavera de 2016

Amostra	Dose efetiva H_e ^{226}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{228}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{210}Pb (mSv/a)		
	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto
Marimbeiro I	$3,9 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
Marimbeiro II	$3,5 \times 10^{-2}$	$8,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^{-1}$	$4,3 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Marimbeiro III	$3,2 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$
Gasosa I	$4,5 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-2}$	1,46	2,27	$2,9 \times 10^{-1}$	$4,1 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$
Gasosa II	$2,2 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-1}$	$6,8 \times 10^{-1}$	$8,8 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$
Gasosa III	$3,9 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-1}$	$5,7 \times 10^{-1}$	$7,5 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$	$3,8 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$
Litinida	$4,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-2}$	1,24	1,93	$2,5 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$
Férrea	$8,1 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-1}$	$3,6 \times 10^{-2}$	-	-	-	$5,4 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$
Magnesiana	$3,2 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-1}$	1,21	$1,5 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$9,7 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$
Laranjal ou Dico	$2,3 \times 10^{-1}$	$5,6 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$8,5 \times 10^{-1}$	1,34	$1,7 \times 10^{-1}$	$9,6 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$
Água potável Cambuquira	$2,2 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$9,1 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$

- Não determinado

Tabela B.11 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão de 2017

Amostra	Dose efetiva H_e ^{226}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{228}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{210}Pb (mSv/a)		
	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto
Marimbeiro I	$3,9 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Marimbeiro II	$3,4 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-1}$	$3,8 \times 10^{-1}$	$4,9 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$
Marimbeiro III	$3,3 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-1}$	$2,7 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Gasosa I	$4,3 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-2}$	1,57	2,44	$3,1 \times 10^{-1}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$9,0 \times 10^{-3}$
Gasosa II	$3,9 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-1}$	$6,7 \times 10^{-1}$	$8,7 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-3}$
Gasosa III	$3,2 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-1}$	$6,8 \times 10^{-1}$	$8,9 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-3}$
Litinida	$5,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-2}$	1,49	2,32	$3,0 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Férrea	$9,4 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$4,2 \times 10^{-2}$	-	-	-	$5,4 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$
Magnesiana	$3,2 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$6,18 \times 10^{-1}$	$9,6 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Laranjal ou Dico	$2,6 \times 10^{-1}$	$6,4 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$9,7 \times 10^{-1}$	1,52	$1,9 \times 10^{-1}$	$8,8 \times 10^{-2}$	$7,6 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$
Água potável Cambuquira	$2,2 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$

- Não determinado

Tabela B.12 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e fonte Laranjal ou Dico coletadas no outono de 2017

Amostra	Dose efetiva H_e ^{226}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{228}Ra (mSv/a)			Dose efetiva H_e ^{210}Pb (mSv/a)		
	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto
Marimbeiro I	$3,9 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Marimbeiro II	$3,4 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-1}$	$3,8 \times 10^{-1}$	$4,9 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$
Marimbeiro III	$3,3 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-1}$	$2,7 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Gasosa I	$4,3 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-2}$	1,57	2,44	$3,1 \times 10^{-1}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$9,0 \times 10^{-3}$
Gasosa II	$3,9 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-1}$	$6,7 \times 10^{-1}$	$8,7 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-3}$
Gasosa III	$3,2 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-1}$	$6,8 \times 10^{-1}$	$8,9 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-3}$
Litinida	$5,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-2}$	1,49	2,32	$3,0 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Férrea	$9,4 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$4,2 \times 10^{-2}$	-	-	-	$5,4 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$
Magnesiana	$3,2 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$6,1 \times 10^{-1}$	$9,6 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Laranjal ou Dico	$2,6 \times 10^{-1}$	$6,4 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$9,7 \times 10^{-1}$	1,52	$1,9 \times 10^{-1}$	$8,8 \times 10^{-2}$	$7,6 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$
Água potável Cambuquira	$2,2 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$

- Não determinado

Tabela B.13 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a do radionuclídeo ^{210}Po das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico coletadas outono, inverno de primavera de 2016.

Amostra	Dose efetiva H_e ^{210}Po (mSv/a) Outono 2016			Dose efetiva H_e ^{210}Po (mSv/a) Inverno 2016			Dose efetiva H_e ^{210}Po (mSv/a) Primavera 2016		
	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto
Marimbeiro I	$3,1 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-3}$	-	-	-	$2,5 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-3}$	$6,8 \times 10^{-3}$
Marimbeiro II	$2,1 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$9,2 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-3}$
Marimbeiro III	$2,1 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-3}$
Gasosa I	$1,4 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$9,4 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-3}$
Gasosa II	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-3}$	-	-	-
Gasosa III	$2,0 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^{-3}$	-	-	-	-	-	-
Litinida	$3,4 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$9,3 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Férrea	$1,1 \times 10^{-1}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$3,7 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$
Magnesiana	-	-	-	$1,9 \times 10^{-2}$	$6,8 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$	-	-	-
Laranjal ou Dico	*	*	*	$3,2 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-3}$	$9,2 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$
Água potável Cambuquira	$1,6 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	-	-	-	-	-	-

* Não amostrado

- Não determinado

Tabela B.14 – Dose efetiva comprometida no corpo inteiro (H_e) mSv/a do radionuclídeo ^{210}Po das águas minerais dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico coletadas no verão e outono de 2017.

Amostra	Dose efetiva H_e ^{210}Po (mSv/a) Verão 2017			Dose efetiva H_e ^{210}Po (mSv/a) Outono 2017		
	5 anos	15 anos	Adulto	5 anos	15 anos	Adulto
Marimbeiro I	$1,9 \times 10^{-2}$	$6,8 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-3}$
Marimbeiro II	$1,7 \times 10^{-2}$	$6,1 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$9,3 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-3}$
Marimbeiro III	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-3}$	$6,1 \times 10^{-3}$
Gasosa I	$2,2 \times 10^{-2}$	$8,2 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$
Gasosa II	-	-	-	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-3}$
Gasosa III	-	-	-	$2,2 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-3}$	$6,1 \times 10^{-3}$
Litinida	$3,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-3}$
Férrea	$1,1 \times 10^{-1}$	$4,0 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$3,7 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-2}$
Magnesiana	-	-	-	-	-	-
Laranjal ou Dico	$1,1 \times 10^{-1}$	$4,0 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$
Água potável Cambuquira	-	-	-	-	-	-

- Não determinado

Apêndice C

Neste apêndice são apresentados em forma de tabelas os resultados de:

- Concentrações em mg/l ou ppm dos elementos químicos determinados por fluorescência de raios X; os elementos Ag, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Se e Ti apresentaram valores abaixo do limite mínimo de detecção (LMD) estabelecido pela curva de calibração, para todas as fontes em todas as coletas analisadas, por isso não são apresentados na tabela de resultados.
- Coeficientes de correlação de Pearson analisados para os elementos, radionuclídeos, pH e temperatura para as estações de outono, inverno e primavera de 2016, e verão de 2017.

Tabela C.1 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta do verão de 2017 em mg/l $\pm$ desvio padrão.

Verão 2017							
Fonte	Elementos						
	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V
Marimbeiro I	3,7 $\pm$ 0,3	82 $\pm$ 4	0,37 $\pm$ 0,01	6,9 $\pm$ 0,8	-	23,2 $\pm$ 2	0,30 $\pm$ 0,04
Marimbeiro II	3,3 $\pm$ 0,9	108,1 $\pm$ 7	0,57 $\pm$ 0,09	10 $\pm$ 1	0,23 $\pm$ 0,03	29,3 $\pm$ 2	0,40 $\pm$ 0,03
Marimbeiro III	3,5 $\pm$ 0,4	104,5 $\pm$ 18	0,45 $\pm$ 0,03	8 $\pm$ 1	0,24 $\pm$ 0,02	28,1 $\pm$ 3	0,38 $\pm$ 0,03
Gasosa I	2,2 $\pm$ 0,5	3,5 $\pm$ 0,3	0,6 $\pm$ 0,07	-	0,30 $\pm$ 0,08	4,7 $\pm$ 0,5	0,80 $\pm$ 0,05
Gasosa II	3,0 $\pm$ 0,3	4 $\pm$ 0,3	0,2 $\pm$ 0,01	-	-	2,0 $\pm$ 0,1	<0,2
Gasosa III	3,7 $\pm$ 0,2	6,8 $\pm$ 0,5	0,6 $\pm$ 0,02	-	0,20 $\pm$ 0,04	3,5 $\pm$ 0,4	0,28 $\pm$ 0,01
Litinada	3,8 $\pm$ 0,3	5,7 $\pm$ 0,9	0,5 $\pm$ 0,01	-	0,30 $\pm$ 0,01	4,0 $\pm$ 0,3	0,30 $\pm$ 0,04
Férrea	3,8 $\pm$ 0,1	23,5 $\pm$ 4	0,5 $\pm$ 0,09	7,8 $\pm$ 1	0,60 $\pm$ 0,09	12,5 $\pm$ 2	0,60 $\pm$ 0,01
Magnesiana	3,7 $\pm$ 0,5	4,3 $\pm$ 0,3	0,6 $\pm$ 0,09	-	0,30 $\pm$ 0,01	3,5 $\pm$ 0,1	0,50 $\pm$ 0,01
Laranjal ou Dico	4,5 $\pm$ 0,2	209,7 $\pm$ 15	0,44 $\pm$ 0,09	21,9 $\pm$ 4	0,22 $\pm$ 0,02	22,4 $\pm$ 3	0,70 $\pm$ 0,07

- Não determinado

Tabela C.2 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta do inverno de 2016 em mg/l $\pm$ desvio padrão.

Inverno 2016							
Fonte	Elementos						
	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V
Marimbeiro I	3,0 $\pm$ 0,5	104,1 $\pm$ 15	0,4 $\pm$ 0,01	8,2 $\pm$ 1	-	30,8 $\pm$ 1	0,4 $\pm$ 0,01
Marimbeiro II	3,2 $\pm$ 0,2	108,1 $\pm$ 35	0,6 $\pm$ 0,03	10 $\pm$ 1	0,21 $\pm$ 0,02	29,3 $\pm$ 2	0,4 $\pm$ 0,01
Marimbeiro III	3,4 $\pm$ 0,2	106,7 $\pm$ 35	0,43 $\pm$ 0,04	8,1 $\pm$ 1	0,26 $\pm$ 0,04	29,7 $\pm$ 2,5	0,4 $\pm$ 0,02
Gasosa I	2,0 $\pm$ 0,1	4,0 $\pm$ 0,3	0,6 $\pm$ 0,02	-	0,3 $\pm$ 0,01	4,9 $\pm$ 0,4	0,8 $\pm$ 0,03
Gasosa II	3,6 $\pm$ 0,5	4,1 $\pm$ 0,2	0,21 $\pm$ 0,03	-	-	2,8 $\pm$ 0,6	<0,2
Gasosa III	3,7 $\pm$ 0,1	6,2 $\pm$ 0,3	0,6 $\pm$ 0,06	-	0,3 $\pm$ 0,06	3,8 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,06
Litinada	3,9 $\pm$ 0,2	6,1 $\pm$ 0,3	0,52 $\pm$ 0,03	-	0,4 $\pm$ 0,07	4 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,01
Férrea	3,5 $\pm$ 0,2	21,5 $\pm$ 4	0,57 $\pm$ 0,01	6,3 $\pm$ 0,5	0,6 $\pm$ 0,03	12,7 $\pm$ 1	0,4 $\pm$ 0,03
Magnesiana	3,6 $\pm$ 0,3	4,4 $\pm$ 0,2	0,61 $\pm$ 0,03	-	0,6 $\pm$ 0,04	4,1 $\pm$ 0,3	0,4 $\pm$ 0,04
Laranjal ou Dico	3,9 $\pm$ 0,4	209,7 $\pm$ 2,9	0,43 $\pm$ 0,03	21,8 $\pm$ 2	0,22 $\pm$ 0,01	33 $\pm$ 3	0,7 $\pm$ 0,03

- Não determinado

Tabela C.3 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta da primavera de 2016 em mg/l $\pm$ desvio padrão.

Fonte	Primavera 2016						
	Elementos						
	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V
Marimbeiro I	2,9 $\pm$ 0,2	78,5 $\pm$ 14	0,36 $\pm$ 0,02	5,4 $\pm$ 1	-	24,2 $\pm$ 2	0,47 $\pm$ 0,06
Marimbeiro II	3,5 $\pm$ 0,1	71,4 $\pm$ 13	0,56 $\pm$ 0,03	6,2 $\pm$ 1	0,20 $\pm$ 0,07	20,6 $\pm$ 1	0,42 $\pm$ 0,02
Marimbeiro III	3,3 $\pm$ 0,1	106,7 $\pm$ 16	0,42 $\pm$ 0,03	8,1 $\pm$ 1	0,22 $\pm$ 0,03	29,7 $\pm$ 2	0,46 $\pm$ 0,02
Gasosa I	2,7 $\pm$ 0,1	4 $\pm$ 0,4	0,62 $\pm$ 0,06	-	0,28 $\pm$ 0,02	5,0 $\pm$ 0,5	0,20 $\pm$ 0,02
Gasosa II	3,9 $\pm$ 0,1	4,1 $\pm$ 0,2	0,22 $\pm$ 0,01	-	-	2,4 $\pm$ 0,05	0,27 $\pm$ 0,03
Gasosa III	3,4 $\pm$ 0,5	6,2 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,01	-	0,32 $\pm$ 0,05	3,5 $\pm$ 0,1	0,60 $\pm$ 0,05
Litinada	3,8 $\pm$ 0,3	6,1 $\pm$ 0,1	0,48 $\pm$ 0,05	-	0,46 $\pm$ 0,03	3,8 $\pm$ 0,6	0,20 $\pm$ 0,06
Férrea	3,1 $\pm$ 0,2	21,6 $\pm$ 0,4	0,56 $\pm$ 0,09	6,5 $\pm$ 1	0,62 $\pm$ 0,03	12,2 $\pm$ 2	0,80 $\pm$ 0,02
Magnesiana	3,9 $\pm$ 0,1	4,4 $\pm$ 0,4	0,65 $\pm$ 0,04	-	0,61 $\pm$ 0,02	4,1 $\pm$ 0,5	0,30 $\pm$ 0,02
Laranjal ou Dico	4 $\pm$ 0,5	206 $\pm$ 26	0,49 $\pm$ 0,02	21 $\pm$ 1	0,25 $\pm$ 0,01	32,5 $\pm$ 3	0,65 $\pm$ 0,01

- Não determinado

Tabela C.4 – Elementos determinados por fluorescência de raios X dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico na coleta do outono de 2016 em mg/l $\pm$ desvio padrão.

Outono 2016							
Fonte	Elementos						
	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V
Marimbeiro I	3,1 $\pm$ 0,5	81,5 $\pm$ 2	0,40 $\pm$ 0,02	6,1 $\pm$ 0,6	-	24,1 $\pm$ 3	0,41 $\pm$ 0,01
Marimbeiro II	3,2 $\pm$ 0,3	80,4 $\pm$ 5	0,50 $\pm$ 0,05	6,3 $\pm$ 1	0,22 $\pm$ 0,02	32,1 $\pm$ 4	0,43 $\pm$ 0,02
Marimbeiro III	3,7 $\pm$ 0,2	100 $\pm$ 5	0,41 $\pm$ 0,02	9,2 $\pm$ 1	0,26 $\pm$ 0,04	30 $\pm$ 3	0,42 $\pm$ 0,06
Gasosa I	2,5 $\pm$ 0,2	3,9 $\pm$ 0,2	0,55 $\pm$ 0,07	-	0,25 $\pm$ 0,05	3,5 $\pm$ 0,2	0,25 $\pm$ 0,01
Gasosa II	3,7 $\pm$ 0,2	4,9 $\pm$ 0,5	0,20 $\pm$ 0,05	-	-	2,5 $\pm$ 0,3	0,34 $\pm$ 0,01
Gasosa III	3,7 $\pm$ 0,2	6,8 $\pm$ 0,3	0,55 $\pm$ 0,02	-	0,30 $\pm$ 0,01	3,2 $\pm$ 0,1	0,40 $\pm$ 0,03
Litinada	4,0 $\pm$ 0,1	6,8 $\pm$ 0,2	0,39 $\pm$ 0,02	-	0,43 $\pm$ 0,04	5,7 $\pm$ 0,1	0,30 $\pm$ 0,03
Férrea	3,8 $\pm$ 0,5	22 $\pm$ 2	0,50 $\pm$ 0,01	5,6 $\pm$ 1	0,51 $\pm$ 0,02	11,5 $\pm$ 2	0,60 $\pm$ 0,02
Magnesiana	3,6 $\pm$ 0,8	4,1 $\pm$ 0,2	0,51 $\pm$ 0,02	-	0,50 $\pm$ 0,02	3,4 $\pm$ 0,2	0,50 $\pm$ 0,01

- Não determinado

Tabela C.5 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do Inverno de 2016 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico

Variáveis	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Po-210	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V	pH	T (°C)
Ra-226	1												
Ra-228	-0,27959	1											
Pb-210	0,79181	-0,12144	1										
Po-210	0,56166	-0,55662	0,67668	1									
Ba	0,51715	-0,01485	0,47489	0,23343	1								
Ca	0,60005	-0,39468	0,28563	0,10267	0,15144	1							
Co	-0,23604	0,003163	0,1824	0,13966	-0,2125	-0,02474	1						
Fe	0,75331	-0,10186	0,41836	0,11643	0,2099	0,87706	-0,06205	1					
Mn	-0,05443	-0,02212	0,39008	0,53167	0,095622	-0,24557	0,78237	-0,17686	1				
K	0,52662	-0,47279	0,265	0,14236	0,006047	0,98086	0,069215	0,81738	-0,18357	1			
V	-0,05161	0,22308	0,027834	-0,03105	-0,44812	0,19131	0,61292	0,34314	0,34491	0,24474	1		
pH	0,72737	-0,5258	0,51822	0,35936	0,28408	0,93406	0,044606	0,79234	-0,10307	0,91822	0,10167	1	
T (°C)	0,29106	0,32051	0,53908	0,35255	0,66375	-0,45181	-0,0496	-0,22546	0,34338	-0,55439	-0,31414	-0,21715	1

Tabela C.6 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do outono de 2016 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico

Variáveis	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Po-210	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V	T (°C)
Ra-226	1											
Ra-228	-0,57829	1										
Pb-210	0,05363	-0,63298	1									
Po-210	0,84331	-0,76447	0,42536	1								
Ba	0,086986	-0,27339	0,59088	0,37343	1							
Ca	-0,00611	-0,60776	0,29329	0,31359	-0,0058	1						
Co	0,081102	-0,05137	0,042216	0,070088	-0,3139	0,08119	1					
Fe	-0,18616	-0,45113	0,22403	0,079592	0,067377	0,83603	0,021233	1				
Mn	0,24225	-0,03274	0,23967	0,21557	0,26988	-0,23494	0,67369	-0,07883	1			
K	0,041278	-0,57069	0,27698	0,33856	-0,04996	0,97823	0,17788	0,81104	-0,10511	1		
V	0,21109	-0,7933	0,93189	0,50432	0,46419	0,40142	0,21503	0,27231	0,27083	0,37596	1	
T (°C)	0,53774	-0,10024	-0,3132	0,16206	-0,13447	-0,51424	-0,08568	-0,46618	-0,04964	-0,58449	-0,14675	1

Tabela C.7 – Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta da primavera de 2016 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico

	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Po-210	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V	pH	T (°C)
Ra-226	1												
Ra-228	0,009832	1											
Pb-210	0,80007	0,14655	1										
Po-210	0,86287	-0,2935	0,60723	1									
Ba	0,21011	0,29505	0,10257	0,086539	1								
Ca	0,45787	-0,29917	-0,0635	0,51183	0,10221	1							
Co	0,40871	-0,01676	0,68022	0,35347	-0,35646	0,06211	1						
Fe	0,81779	0,056166	0,44091	0,69073	0,41438	0,72836	0,10237	1					
Mn	0,44753	-0,1181	0,76126	0,52765	-0,02782	-0,11323	0,79207	0,12745	1				
K	0,43943	-0,36083	-0,04943	0,55188	-0,11078	0,97167	0,17298	0,65486	-0,04238	1			
V	0,46017	-0,68324	0,25127	0,4187	0,030189	0,59785	0,2163	0,49241	0,16958	0,55969	1		
pH	0,56884	-0,1682	0,058555	0,51425	0,20959	0,95611	0,081093	0,75811	-0,12796	0,89243	0,59012	1	
T (°C)	-0,30617	0,36393	0,21687	-0,41465	0,012406	-0,97758	-0,01917	-0,59326	0,20823	-0,97252	-0,54288	-0,90667	1

Tabela C.8 –Coeficientes de correlação de Pearson para a coleta do verão de 2017 dos Parques das Águas de Cambuquira, Marimbeiro e Fonte Laranjal ou Dico

	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Po-210	Ba	Ca	Co	Fe	Mn	K	V	pH	T (°C)
Ra-226	1												
Ra-228	-0,03755	1											
Pb-210	0,86361	0,004756	1										
Po-210	0,91403	-0,30774	0,82351	1									
Ba	0,47602	-0,24849	0,32787	0,43439	1								
Ca	0,40644	-0,32477	0,005846	0,37148	0,49783	1							
Co	-0,05406	0,079689	-0,04895	0,093917	0,022475	0,000946	1						
Fe	0,75786	-0,11718	0,40265	0,63042	0,51216	0,85361	0,013067	1					
Mn	0,25589	-0,17431	0,37551	0,49085	0,077307	-0,06294	0,74823	0,10221	1				
K	0,28264	-0,40063	-0,10143	0,34409	0,33632	0,95294	0,16673	0,74025	0,078749	1			
V	0,50575	-0,00816	0,45576	0,56568	-0,11275	0,18409	0,57556	0,43227	0,66693	0,30699	1		
pH	0,34549	-0,33402	-0,00383	0,29086	0,46515	0,92591	0,00546	0,77623	-0,13571	0,84837	0,055398	1	
T (°C)	0,11036	0,14079	0,35846	0,003898	-0,4482	-0,46927	-0,22025	-0,19753	-0,10701	-0,5424	0,029556	-0,20748	1

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**