

RESSALVA

Atendendo solicitação da
autora, o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 08/05/2026.



**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**ISÓTOPOS NATURAIS DE RÁDIO APLICADOS AOS
RECURSOS HÍDRICOS**

MARTA LILIAN VICTORINO PATRICIO

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

RIO CLARO - SP - 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

MARTA LILIAN VICTORINO PATRICIO

ISÓTOPOS NATURAIS DE RÁDIO APLICADOS AOS
RECURSOS HÍDRICOS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. DANIEL MARCOS BONOTTO

Rio Claro - SP

2025

P314i Patricio, Marta Lilian Victorino
Isótopos naturais de rádio aplicados aos recursos hídricos / Marta
Lilian Victorino Patricio. -- Rio Claro, 2025
192 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Daniel Marcos Bonotto

1. Rádio. 2. Água potável. 3. Geoquímica. 4. Espectrometria gama.
5. Monitoramento ambiental. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presença de isótopos radioativos, como o rádio, em águas destinadas ao consumo humano levou a Organização Mundial da Saúde (OMS) a recomendar o monitoramento desses isótopos para garantir a qualidade da água. A crescente demanda por água potável, impulsionada pelo crescimento populacional, urbanização e mudanças climáticas, intensificou a busca por novos recursos hídricos. As águas subterrâneas, devido à sua abundância, características físico-químicas favoráveis e menor custo de captação, surgem como uma alternativa viável. Além disso, as águas superficiais, frequentemente inadequadas para consumo, tornam seu tratamento oneroso. Diante disso, é fundamental investigar a presença de radionuclídeos naturais dissolvidos, especialmente aqueles pertencentes às séries de decaimento do urânio e do tório. A introdução desses radionuclídeos pode ocorrer por fatores geogênicos, como a interação com materiais que os contêm, e fatores antrópicos, como a mineração e o uso de fertilizantes fosfatados. A metodologia desenvolvida neste trabalho oferece uma abordagem inovadora e de baixo custo para medir isótopos naturais de rádio em amostras de água, utilizando espectrometria gama de alta resolução. Essa técnica, que dispensa reagentes analíticos e reduz a geração de resíduos prejudiciais, é essencial para preencher lacunas na literatura científica sobre a concentração de isótopos de rádio em águas subterrâneas. A aplicação dessa metodologia permitirá uma avaliação mais precisa da qualidade da água e contribuirá para o monitoramento ambiental e a segurança radiológica, pois o rádio é altamente tóxico, acumulando-se nas estruturas ósseas quando ingerido através de água potável e alimentos, e causando sérios danos à saúde humana.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The presence of radioactive isotopes, such as radium, in water intended for human consumption has led the World Health Organization (WHO) to recommend monitoring these isotopes to ensure water quality. The growing demand for potable water, driven by population growth, urbanization, and climate change, has intensified the search for new water resources. Groundwater, due to its abundance, favorable physicochemical properties, and lower extraction costs, emerges as a viable alternative. Additionally, surface water is often unsuitable for consumption, making its treatment costly. Given this context, it is crucial to investigate the presence of dissolved natural radionuclides, particularly those belonging to the uranium and thorium decay series. The introduction of these radionuclides into water resources may occur due to geogenic factors, such as interaction with radionuclide-bearing materials, and anthropogenic factors, including mining, phosphate fertilizer use, and the processing of radioactive minerals. The methodology developed in this study offers an innovative and cost-effective approach to measuring natural radium isotopes in water samples using high-resolution gamma spectrometry. This technique eliminates the need for analytical reagents that could generate environmentally harmful waste, making it a key tool for addressing gaps in the scientific literature regarding radium isotope activity concentrations in groundwater. The application of this methodology will enable a more accurate assessment of water quality and contribute to environmental monitoring and radiological safety, as radium is highly toxic, accumulating in bone structures when ingested through drinking water and food, and posing serious human health risks

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

MARTA LILIAN VICTORINO PATRICIO

ISÓTOPOS NATURAIS DE RÁDIO APLICADOS AOS RECURSOS HÍDRICOS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente

Comissão Examinadora

Prof. Dr. DANIEL MARCOS BONOTTO

IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. JOSÉ REINALDO CARDOSO NERY

UNIFAP / MACAPÁ (AP)

Prof. Dr. JORGE LUIS NEPOMUCENO DE LIMA

UNIR/Porto Velho (RO)

Prof. Dr. LUIS HENRIQUE MANCINI

Centro Politécnico/UFPR/Curitiba (PR)

Prof. Dra. TATIANI DE PAULA PINOTTI SABARIS MEGLHIORATTI

SENAI/São Caetano do Sul (SP)

Conceito: Aprovada.

Rio Claro (SP), 08 de maio de 2025.

À Marie Skłodowska Curie

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) – código de financiamento 001. Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro, que tornou possível a realização deste trabalho de doutorado no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente.

À Inteligência Suprema, criadora do universo, fonte da existência e da diversidade, que, ao longo de bilhões de anos, possibilitou a manifestação da vida, sua evolução e seleção natural, desvelando as maravilhas da criação por meio das leis que regem a natureza e despertando o compromisso com a busca constante pelo conhecimento e a compreensão profunda dessa complexa harmonia.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Bonotto, pesquisador exemplar, competente e íntegro. Pessoa de caráter raro, cuja paciência e constante disposição para orientar, dialogar e apoiar foram essenciais ao longo desta trajetória. Expresso minha sincera gratidão não apenas pela orientação acadêmica de excelência, mas também pela convivência respeitosa e acolhedora, marcada por empatia e confiança.

À banca examinadora, composta pelos professores doutores: Reinaldo Nery, Jorge Nepomuceno, Luis Mancini e Tatiani Meglhioratti, agradeço pelas valiosas contribuições e orientações acadêmicas oferecidas à minha tese. Ao Prof. Antonio Artur (*in memoriam*), cuja participação infelizmente não foi possível, deixo meu reconhecimento e gratidão.

Ao Prof. Dr. Éderio Bidoia, agradeço pelos ensinamentos, conselhos, e pela amizade generosa ao longo desta jornada.

Ao Prof. Dr. Roberto Naves Domingos (*in memoriam*), minha sincera gratidão pela ajuda em diversos momentos, pela prontidão, humanidade, alegria e humildade sempre presentes.

Aos meus pais, Marco e Joana (*in memoriam*), pelo dom da vida e por tudo o que representam. Em especial, ao meu amado pai, cuja presença amorosa e apoio incondicional foram fundamentais no momento mais difícil desta jornada.

À minha mãe de coração, Valentina, pela presença afetuosa, pela cumplicidade e pelo amor constante, desde sempre; e ao tio Augusto, pelo apoio firme, pela presença acolhedora e pelo carinho genuíno que sempre me acompanharam ao longo de toda a caminhada.

Vitor e Juliana, pelo carinho, pelas boas conversas, pelos cafés, pelo apoio constante e pelo afeto genuíno, compadres de jornada! A César e Jucimara, pelo carinho, pelo apoio e pelas conversas sempre acolhedoras!

Bruno, cuja presença foi, em diferentes momentos, abrigo, impulso, escuta e carinho. Entre revoadas, um pouso seguro que respeita o voo, algo que, com delicadeza, continua a nos conectar ao longo do tempo.

À tia Auxiliadora, ao tio Roberto e à Adriana, pelo acolhimento, afeição e carinho de sempre.

À minha família de Rio Claro, em especial à Denise — pessoa maravilhosa e ímpar, sempre de braços abertos e pronta a acolher em todos os momentos. Vocês são sinônimo de companhia, fé e afeto. Pelas conversas, pela afeição e pelas boas risadas: Francisco, Thais, João, Gabriel, Beatriz, Karine, Valentina, Joana e Vitória. À Janice, pela generosidade, alegria e carinho genuíno. À Regina, pelos cafés, pelas boas conversas e pelo abraço acolhedor que aquece.

À Ana Carolina, pelo carinho, pela afeição genuína, pela ajuda em tantos momentos e pelas conversas sobre tudo. À Marli, pelo carinho, afeto, diálogos construtivos e pela prontidão de sempre. Ao Gustavo, pela amizade, afeto genuíno, pelas conversas científicas e pelas risadas infinitas. Ao Adeloir, pelo carinho, amizade, afeição sincera e por cuidar do meu cabelo.

Ao pessoal do laboratório, Gabrielle, André, Fábio, Marina, Isabela L. e Isabela G., pela companhia, pelas “comidas radioativas”, pela ajuda nos dias intensos de trabalho, pelas idas aos rocks com a Gabi, pelas conversas e pelas risadas memoráveis com o Fábio. Ao André, em especial: o campo foi dele, mas a amizade de caverna, entre mim, André e Raphael Parra, é para sempre, marcada por aventuras inesquecíveis em dias gelados, com geadas ou com comida mineira!

À família UNESP, por toda a ajuda, amizade e conversas ao longo de toda a minha jornada: Carina, Mariana, Lauren, Adriano, Márcia, Carlos, Katarine e Caroline. Ao Prof. Didier e à comissão organizadora do XV Encontro do PPGGMA, pelos diálogos estabelecidos e pelo empenho em todo o trabalho desenvolvido para a realização desse evento memorável.

Aos amigos queridos de longa data, com quem o tempo pode passar, mas a amizade e o afeto permanecem inalterados: Karen, João Renato, Marco, Ana Laura e Marcela! À Rachel, pela amizade, pelas ótimas conversas, pelas dicas e, claro, pelo presente especial: a areia monazítica!

A criança interior que sonhava em ser cientista... Que questionava, mergulhava em livros, encantava-se por fósseis, insetos e flores, observava com fascínio uma nascente de água, desejava compreender por que a luz brilhava e exibia cores diferentes. Queria entender não apenas o que era visível, mas também o que era ao mesmo tempo perigoso e incrivelmente fascinante: a radioatividade!

RESUMO

O rádio está presente em muitas águas destinadas ao consumo humano, e a crescente necessidade por água potável intensifica a busca por novos recursos hídricos. As águas subterrâneas representam uma alternativa viável para o abastecimento devido à sua abundância, características físico-químicas favoráveis, fornecimento de íons essenciais à saúde, menor custo de captação e, principalmente, pela qualidade frequentemente inadequada das águas superficiais e pelo alto custo associado ao seu tratamento. O Brasil é o quarto maior produtor de água mineral envasada no mundo, com um crescimento anual de 7,6%. A legislação brasileira estabelece normas para a produção de água mineral; contudo, muitas dessas águas subterrâneas contêm isótopos radioativos, exigindo um melhor entendimento sobre a presença de radionuclídeos naturais dissolvidos, especialmente aqueles pertencentes às séries de decaimento do urânio e do tório, como o rádio e o radônio. A introdução de radionuclídeos nos recursos hídricos pode ocorrer por diversas causas, incluindo fatores geogênicos, como a interação da água com materiais portadores desses elementos, rochas, solos, sólidos em suspensão e sedimentos de fundo. Além disso, há fatores antrópicos, como o crescimento de processos tecnológicos, a mineração e o processamento de minerais radioativos, bem como o uso de fertilizantes fosfatados. Diante desse cenário, a Organização Mundial da Saúde recomenda o monitoramento de diversos radionuclídeos para garantir a qualidade da água destinada ao consumo humano. Além das implicações para a saúde, os isótopos naturais de rádio possuem grande relevância científica, sendo amplamente utilizados como traçadores naturais para investigar mecanismos de transferência de constituintes em processos de interação água-solo/rocha e transporte de elementos dissolvidos em aquíferos. Nos diferentes compartimentos ambientais, os isótopos de rádio podem ser separados geoquimicamente devido às suas distintas meias-vidas, sendo transferidos para a água subterrânea por diversos processos, como decaimento de radionuclídeos precursores, adsorção na superfície do aquífero, dissolução de sólidos, troca iônica e lixiviação. Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia eficiente para detectar a presença desses isótopos em águas subterrâneas, considerando suas diferentes meias-vidas. A metodologia proposta foi aplicada a amostras de águas subterrâneas com distintas características geoquímicas, oriundas de diferentes sistemas aquíferos. O método baseia-se na espectrometria gama de alta resolução, utilizando um detector HPGe instalado no Laboratório de Radiações Ionizantes (LARIN) do UNESPetro – Centro de Ciências Naturais Aplicadas, IGCE-UNESP, campus de Rio Claro. O sistema espectrométrico foi devidamente calibrado em energia, concentração e atividade, permitindo a análise precisa da presença de radionuclídeos em águas subterrâneas, e os resultados foram comparados com valores estabelecidos pela legislação vigente.

Palavras-chave: Rádio; Água potável; Geoquímica; Espectrometria gama; Monitoramento ambiental, Dosimetria.

ABSTRACT

Radium is present in many waters intended for human consumption, and the growing demand for potable water intensifies the search for new water resources. Groundwater represents a viable alternative for supply due to its abundance, favorable physicochemical characteristics, provision of essential ions for human health, lower capture cost, and, primarily, due to the often inadequate quality of surface waters and the high cost associated with their treatment. Brazil is the fourth largest producer of bottled mineral water in the world, with an annual growth rate of 7.6%. Brazilian legislation sets standards for mineral water production, however, many of these groundwater sources contain radioactive isotopes, necessitating a better understanding of the presence of dissolved natural radionuclides, particularly those from the uranium and thorium decay series, such as radium and radon. The introduction of radionuclides into water resources can occur due to various causes, including geogenic factors such as water interaction with materials carrying these elements, such as rocks, soils, suspended solids, and bottom sediments. Additionally, anthropogenic factors such as the growth of technological processes, mining, and processing of radioactive minerals, as well as the use of phosphate fertilizers, contribute. In this context, the World Health Organization recommends monitoring several radionuclides to ensure the quality of drinking water. Apart from health implications, natural radioisotopes of radium hold great scientific relevance, being widely used as natural tracers to investigate mechanisms of constituent transfer in water-soil/rock interactions and dissolved element transport in aquifers. In different environmental compartments, radium isotopes can be separated by their distinct half-lives and are transferred to groundwater through processes such as precursor radionuclide decay, adsorption on the aquifer surface, dissolution of solids, ion exchange, and leaching. In this work, an efficient methodology was developed to detect the presence of these isotopes in groundwater, taking into account their distinct half-lives. The proposed methodology was applied to groundwater samples with different geochemical characteristics from various aquifer systems. The method is based on high-resolution gamma spectrometry using an HPGe detector installed at the Laboratory of Ionizing Radiation (LARIN) of UNESPetro – Center for Applied Natural Sciences, IGCE-UNESP, Rio Claro campus. The spectrometric system was properly calibrated in energy, concentration, and activity, allowing precise analysis of radionuclide presence in groundwater and the comparison of results with values established by the current legislation.

Keywords: Radium; Potable water; Geochemistry; Gamma spectrometry; Environmental monitoring; Dosimetry.

Title in english: NATURAL RADIUM ISOTOPES APPLIED TO WATER RESOURCES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Séries naturais de decaimento radioativo dos nuclídeos ^{238}U ($4n+2$), ^{232}Th ($4n$) e ^{235}U ($4n+3$)	38
Figura 2: Decaimento alfa	40
Figura 3: Decaimento beta	41
Figura 4: Representação do decaimento β para diferentes energias e probabilidades	42
Figura 5: Captura eletrônica e emissão de raio X	43
Figura 6: Decaimento gama	49
Figura 7: Coeficientes de atenuação do chumbo em função da energia	51
Figura 8: Efeito Compton	56
Figura 9: Efeito fotoelétrico	57
Figura 10: Formação de pares	58
Figura 11: Dosagem anual média devido a radioatividade natural	60
Figura 12: Comparação entre os espectros gama efetuados por detectores do tipo NaI, CZT, CdTe e HPGe	65
Figura 13: Composto que continha o elemento rádio como princípio ativo	68
Figura 14: Diagrama de aquífero costeiro não confinado, com as principais vias de descarga de águas subterrâneas submarinas	74
Figura 15: Municípios onde foram coletadas as amostras de águas subterrâneas deste trabalho	86
Figura 16: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná	87
Figura 17: Seis supersequências que constituem a Bacia do Paraná	88
Figura 18: Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná	90
Figura 19: Unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo	91

Figura 20: Municípios onde foram coletadas amostras de águas subterrâneas em diferentes sistemas aquíferos aflorantes	92
Figura 21: Mapa geológico simplificado do Maciço Alcalino de Poços de Caldas	94
Figura 22: Faixa Alto Rio Grande com a Nappe Socorro-Guaxupé	96
Figura 23: Representação esquemática de circulação da água junto às fontes de Caxambu (MG), com a existência de brechas alcalinas	98
Figura 24: Espectrômetro HPGe instalado no UNESPetro, IGCE-UNESP- Campus de Rio Claro	106
Figura 25: Esquema geral do sistema que compõe o espectrômetro gama com detector (fora de escala) HPGe	108
Figura 26: Recipiente <i>Marinelli</i> , que é vazado para se encaixar no detector	110
Figura 27: Volumes V_1 e V_2 do recipiente <i>Marinelli</i>	112
Figura 28: Determinação dos volumes V_1 e V_2 do recipiente <i>Marinelli</i> e forma vazada	112
Figura 29: Recipiente <i>Marinelli</i> contendo os volumes: 0,3 L; 0,4 L e 1 L	113
Figura 30: Determinação do volume do recipiente usado para armazenamento dos padrões	114
Figura 31: Comparação entre os recipientes de armazenamento dos padrões e frasco <i>Marinelli</i> nas medidas com o detector HPGe	115
Figura 32: Direção do feixe de fótons gama no recipiente contendo o padrão e frasco <i>Marinelli</i> , colocados no detector HPGe. Vetores vermelhos representam os fótons que saem do detector; em verde as perdas (atenuação)	116
Figura 33: Feixe de fótons gama atuando no frasco <i>Marinelli</i> indicando a geometria bidirecional. Vetores vermelhos representam os fótons que saem do detector; em verde as perdas (atenuação)	116
Figura 34: Curva de calibração em energia do gamaespectrômetro baseado no detector HPGe	122
Figura 35: Curva da eficiência média de detecção (ϵ_f) em função da energia da radiação gama do ^{228}Ac	129

- Figura 36:** Curvas de eficiência de detecção referente ao ^{228}Ac . Em vermelho, os padrões de tório (10.000 a 10 ppm); em azul, a curva de eficiência média, com energias gama de 99 a 409 keV **130**
- Figura 37:** Curva de calibração em concentração de atividade específica (Bq/g) referente ao pico do ^{226}Ra **135**
- Figura 38:** Curva de calibração em concentração de atividade específica (Bq/g) relativa ao pico do ^{223}Ra **136**
- Figura 39:** Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) relativa ao pico do ^{224}Ra **137**
- Figura 40:** Curva de calibração em concentração de atividade (Bq/g) relativa ao ^{228}Ra , aplicando a energia do isótopo ^{228}Ac (energia = 338 keV) **138**
- Figura 41:** Curva experimental de calibração em concentração de atividade do ^{226}Ra relativo à aos padrões utilizados **141**
- Figura 42:** Curva teórica obtida através de cálculos feitos na curva experimental ^{226}Ra **144**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Orientação para os níveis de ingestão de radionuclídeos que podem estar presentes na água potável	61
Tabela 2: Valores aproximados para alguns radionuclídeos	63
Tabela 3: Concentração média de tório em rochas ígneas	79
Tabela 4: Concentração média de tório em rochas metamórficas	80
Tabela 5: Concentração média de tório em rochas sedimentares	80
Tabela 6: Concentração média de urânio em rochas ígneas	83
Tabela 7: Concentração média de urânio em rochas metamórficas	83
Tabela 8: Concentração média de urânio em rochas sedimentares	84
Tabela 9: Amostras analisadas neste trabalho. No caso dos poços tubulares, para a litologia, os valores entre parênteses correspondem à profundidade (em m)	100
Tabela 10: Coeficientes de atenuação linear (em cm^{-1}) para diferentes materiais com energias de fótons de 100, 200 e 500 keV	111
Tabela 11: Volumes dos frascos usados no trabalho	112
Tabela 12: Cálculo do valor de μ (cm^{-1}) dos materiais usados neste trabalho	117
Tabela 13: Emissões gama referentes ao decaimento β^- das séries do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , cuja intensidade absoluta é maior que 1%	119
Tabela 14: Emissões gama referentes ao decaimento α das séries do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , cuja intensidade absoluta é maior que 1%	120
Tabela 15: Calibração em energia para o sistema utilizado	121
Tabela 16: Dados de atividade (Bq) total (soma das atividades do ^{238}U e ^{235}U) por massa (Bq/g) dos padrões de urânio	122
Tabela 17: Dados de atividade (Bq) e atividade por massa (Bq/g) dos padrões de tório	123
Tabela 18: Dados dos padrões de tório nas leituras do pico do ^{228}Ac (99 a 409 keV), utilizados na calibração de eficiência	127

Tabela 19: Eficiência média de detecção para cada energia da radiação gama associada ao ^{228}Ac	129
Tabela 20: Eficiência de detecção dos isótopos de rádio	131
Tabela 21: Equações aplicadas para determinação da atividade de cada isótopo de rádio	132
Tabela 22: Dados utilizados para a calibração em concentração de atividade do isótopo ^{226}Ra relativo aos padrões de urânio, com proporção isotópica relativa de 99,284% do ^{238}U	133
Tabela 23: Dados utilizados para a calibração em concentração de atividade do isótopo ^{223}Ra , relativo aos padrões de urânio, com proporção isotópica relativa de 0,711% do ^{235}U	134
Tabela 24: Dados obtidos para a calibração dos padrões de urânio em leituras relativas ao pico do ^{226}Ra , utilizando o fator de correção (5,9%) e proporção isotópica relativa de 99,284% do ^{238}U	134
Tabela 25: Dados obtidos para a calibração dos padrões de urânio em leituras relativas ao pico do ^{223}Ra , utilizando proporção isotópica relativa de 0,711% do ^{235}U	135
Tabela 26: Dados obtidos para calibração dos padrões de tório em leituras relativas ao pico do ^{224}Ra utilizando o fator de correção (0,03%)	137
Tabela 27: Dados obtidos para calibração dos padrões de tório em leituras relativas ao pico do ^{228}Ra , utilizando a energia do radionuclídeo ^{228}Ac (energia = 338 keV)	138
Tabela 28: Valores usados para obter a curva experimental de calibração em concentração de atividade do ^{226}Ra relativo à diluição do padrão utilizado	140
Tabela 29: Determinação da eficiência para cada isótopo de rádio	142
Tabela 30: Valores usados na curva teórica dos rádio	142
Tabela 31: Determinação dos limite crítico e limite de detecção para as radiações de fundo dos isótopos de rádio a serem aplicados nas amostras	145
Tabela 32 Comparação entre as metodologias para o ^{226}Ra (Bq/L): M1 (verde), M2 (preto), M3 (azul) e valores <Ld (vermelho)	147
Tabela 33 Comparação entre as metodologias para o ^{224}Ra (Bq/L): M1 (verde), M2 (preto), M3 (azul) e valores <Ld (vermelho)	150

Tabela 34: Comparação entre as metodologias para o ^{223}Ra (Bq/L): M1 (verde), M2 (preto), M3 (azul) e valores <Ld (vermelho) **153**

Tabela 35: Comparação entre as metodologias para o ^{228}Ra (Bq/L): M1 (verde), M2 (preto), M3 (azul) e valores <Ld (vermelho) **156**

Tabela 36: Determinação da precisão das metodologias M1, M2 e M3 **160**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.2 Objetivos	23
2. PRINCÍPIOS DA RADIOATIVIDADE	25
2.1 A descoberta da radioatividade	25
2.2 Instabilidade Nuclear	29
2.3 Decaimento radioativo	31
2.4 Taxa de desintegração, vida-média e meia-vida	32
2.5 Transformações radioativas sucessivas	35
2.6 Equilíbrio secular	36
2.7 Séries radioativas	38
2.8 Decaimento Alfa (α)	39
2.9 Decaimento Beta (β^-)	40
2.10 Captura Eletrônica	42
3. INTERAÇÃO DAS RADIAÇÕES COM A MATÉRIA	44
3.1 Radiação e interação	44
3.2 Interação de fótons com a matéria	45
3.3 Radiações eletromagnéticas ionizantes	46
3.4 Os raios X	47
3.5 Os raios gama γ	48
3.6 Coeficiente de atenuação linear total, μ	49
3.7 Ensaio não destrutivo (NDA)	52

3.8	Interação dos raios gama com a matéria	54
3.9	Efeito Compton	55
3.10	Efeito fotoelétrico	56
3.11	Produção de pares (elétron-pósitron)	57
3.12	Radicais livres produzidos por radiação	58
3.13	Dosagem	59
3.14	Espectrometria gama	64
4.	RÁDIO, TÓRIO E URÂNIO NO MEIO AMBIENTE	67
4.1	Propriedades gerais do rádio	67
4.2	Ocorrência isotópica	69
4.3	O rádio no ambiente	69
4.4	Comportamento geoquímico do rádio	72
4.5	Os riscos relacionados ao rádio no ambiente	75
4.6	Distribuição de rádio na geosfera	77
4.7	Ocorrência natural de tório	78
4.8	Ocorrência natural de urânio	81
5.	ÁREA DE ESTUDO	85
5.1	Contexto geológico e aquíferos da bacia do Paraná	86
5.2	Província Hidrogeológica Escudo Oriental do Sudeste	92
5.2.1	O maciço alcalino de Poços de Caldas	93
5.2.2	Faixa Alto Rio Grande	95
5.3	Amostras analisadas	99

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	105
6.1 Levantamento bibliográfico e desenvolvimento do projeto	105
6.2 Gamaespectrometria com HPGe	105
6.3 Atenuação e geometria das amostras e padrões	110
6.4 Volume das amostras e padrões	111
6.5 Geometria e atenuação	114
6.6 Limite de Detecção e Limite crítico	117
6.7 Radiação de Fundo (BG)	118
6.8 Calibrações	118
6.8.1 Calibração do sistema em energia	121
6.8.2 Calibração do sistema em concentração	122
6.8.3 Calibração do sistema em concentração de atividade	123
6.8.4 Eficiência de detecção do espectrômetro gama	123
6.8.5 Concentração de atividade das amostras	124
7. METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS	126
7.1 M1 - Metodologia 1: eficiência de detecção	127
7.2 M2 - Metodologia 2: padrões de U e Th	132
7.2.1 Calibração em concentração de atividade	133
7.2.2 ^{226}Ra	134
7.2.3 ^{223}Ra	135
7.2.4 ^{224}Ra	136
7.2.5 ^{228}Ra	138
7.3 M3 - Metodologia 3: redução do efeito matriz nas amostras	139

8. RESULTADOS	147
9. CONCLUSÕES	164
REFERÊNCIAS	166
Anexo A	181
Anexo B	185

1. INTRODUÇÃO

O rádio é um elemento radioativo, sendo o mais pesado dos metais alcalino-terrosos e possui características geoquímicas semelhantes às do bário e do cálcio. No ambiente, suas propriedades químicas são governadas por processos de troca iônica e adsorção, mecanismos que controlam sua taxa de transporte em sistemas aquáticos e no solo.

As trocas iônicas são orientadas por interações coulombianas entre cátions com diferentes estados de oxidação, sendo essa uma característica bem definida do elemento. Contudo, se apenas as forças eletrostáticas fossem consideradas, todos os cátions alcalino-terrosos tenderiam a se adsorver ou a realizar trocas iônicas (LANGMUIR; REISE, 1985).

A relevância dos estudos que caracterizam esses isótopos deve-se à sua acentuada periculosidade. Quando ingeridos por longos períodos, podem liberar intensas doses de radiação para as estruturas ósseas, onde tendem a se acumular. Além dos riscos associados à ingestão de rádio, há também a preocupação com a inalação de radônio (produto de decaimento do rádio) e a ingestão de outros membros das séries de decaimento (BAYES *et al.* 1996).

A Organização Mundial de Saúde colocou em sua legislação vigente uma lista com vários radionuclídeos que devem ser monitorados para garantir a qualidade das águas ingeridas, que inclui vários radionuclídeos naturais pertencentes às séries de decaimento do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th (WHO, 2011). Diversos estudos apontam que os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn têm sido encontrados em concentrações de atividade que podem ser preocupantes para a saúde humana (DESIDERI *et al.* 2007).

Os radionuclídeos regularmente monitorados em águas para a avaliação da qualidade radiológica são o ^{226}Ra e o ^{228}Ra , em função de suas meias-vidas mais longas. Os limites recomendados pelas legislações brasileira e da OMS para a ingestão de ^{226}Ra e ^{228}Ra em água potável são de 1 Bq/L e 0,1 Bq/L, respectivamente (BRASIL. Ministério da Saúde, 2011; WHO, 2011).

A agência United States Environmental Protection Agency (USEPA) instituiu o valor limite de 0,185 Bq/L para a concentração de atividade combinada de ^{226}Ra e ^{228}Ra em águas destinadas ao consumo humano, pois diversas fontes de água mineral ultrapassam esse valor (KITTO *et al.* 2005).

O Comitê das Nações Unidas pesquisa os impactos da radioatividade e avalia a exposição dos seres vivos a agentes naturais de radiação. As fontes naturais são responsáveis por aproximadamente 80% da radiação emitida (UNSCEAR, 2010).

A taxa de radiação pode variar consideravelmente de um lugar para outro devido a diversos fatores, como a concentração e o tipo de radionuclídeos presentes nos solos, rochas e sedimentos, e a quantidade de água incorporada pelo homem por meio da ingestão, dos alimentos, da imersão e da inalação (DESIDERI *et al.* 2007).

As águas minerais utilizadas para consumo humano, após o engarrafamento, normalmente são de origem subterrânea e frequentemente contêm mais de 1 g/L de sólidos totais dissolvidos (STD). Águas consideradas medicinais são potáveis, podendo ser envasadas e comercializadas e fornecem íons essenciais à saúde humana, sendo amplamente utilizadas para consumo. Elas são classificadas de acordo com a concentração total de sais dissolvidos (STD < 1 g/L) como águas doces ou minerais e apresentam componentes benéficos ao organismo humano (CRUZ & FRANÇA, 2006; KOZLOWSKA *et al.* 2007).

Aquíferos fraturados contêm alguns tipos de rochas com concentrações relativamente altas de urânio e tório, como granitos e rochas alcalinas, que podem colaborar para a liberação de níveis elevados de rádio nas águas. Além desses fatores geogênicos, atividades antropogênicas como mineração de minérios, produção de fertilizantes e geração de eletricidade por usinas nucleares também podem aumentar a presença de rádio nos recursos hídricos (MANCINI ; BONOTTO, 2022).

Os radionuclídeos naturais que ocorrem em águas minerais e potáveis têm como origem a dissolução de gases e minerais presentes nas rochas que formam os aquíferos. As características geológicas dos aquíferos, propriedades físico-químicas e condições hidrológicas são fatores que determinam a qualidade das águas. O abastecimento de radionuclídeos em águas subterrâneas tem sido estudado por áreas de pesquisa como Física Médica, Hidrologia e Geoquímica Ambiental (GODOY, J.; GODOY, M., 2006).

Os radioelementos tório e urânio quando estão dissolvidos em águas superficiais sofrem a ação de fatores como pH e variação da concentração devido a salinidade, o que pode causar a sua precipitação ou adsorção em sedimentos. A infiltração é o mecanismo responsável pelo reabastecimento de aquíferos, podendo levar esses radioelementos para as águas subterrâneas (MAZZILLI *et al.* 2013).

O Brasil é o quarto maior produtor de água mineral engarrafada no mundo, com um crescimento médio anual de 7,6%. Atualmente, o país possui cerca de 1.700 concessões de lavra de água mineral. O aumento da produção deve-se a diversos fatores, como regulamentações e certificações de qualidade, crescimento do turismo e do setor de spas, mudanças nos hábitos de consumo, expansão do mercado e maior acessibilidade, crescimento populacional e variações nas condições climáticas (ANM, 2018; ABINAM, 2025).

A Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou recentemente a Resolução ANM nº 193, de 27 de dezembro de 2024 que consolida as especificações técnicas para o aproveitamento das águas minerais e potáveis de mesa, revogando atos normativos anteriores. Essa resolução atualiza e consolida a norma referente ao envasamento e à rotulagem de águas minerais no país. De acordo com essa norma, o rótulo deve conter as seguintes informações obrigatórias: identificação e origem, composição e qualidade, informações regulatórias e legais, além de advertências e recomendações (BRASIL, 2024).

Este trabalho descreve uma metodologia eficaz desenvolvida para calibrar um espectrômetro gama de alta resolução, utilizando um detector germânio hiperpuro (HPGe), para medir as atividades dos isótopos naturais de rádio (^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra e ^{228}Ra) em águas destinadas ao consumo humano. A aplicação do método considerou a concentração de atividade de rádio em amostras de águas subterrâneas provenientes de diferentes sistemas aquíferos nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, várias delas consideradas águas minerais.

9. CONCLUSÕES

Este trabalho descreve uma metodologia radiométrica avançada para a medição simultânea dos quatro isótopos naturais de rádio ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra e ^{228}Ra em amostras de água. Esses isótopos possuem meias-vidas muito diferentes, pertencentes às séries de decaimento radioativo do ^{238}U (^{226}Ra), ^{235}U (^{223}Ra) e ^{232}Th (^{228}Ra e ^{224}Ra).

As radiações gama relacionadas aos decaimentos alfa e beta dos isótopos foram determinadas usando um detector HPGe coaxial P-type de alta resolução abrangendo o intervalo de energia de aproximadamente 180–350 keV, correspondente a energia dos isótopos de rádio. Depois da calibração do sistema espectrométrico em energia, cinco padrões de areia de monazita com diferentes concentrações de tório, provenientes do New Brunswick Laboratory (Departamento de Energia dos EUA), permitiram determinar a eficiência do detector em função da energia, com base em emissões gama de ^{228}Ac . Foram feitos os cálculos da proporção isotópica dos ^{238}U (99,284%) e ^{235}U (0,711%), de acordo com a disposição natural dos núclídeos contidos nos padrões utilizados, envolvendo atividade específica e mol e os valores obtidos foram aplicados as amostras. Utilizando padrões de ^{226}Ra foi obtida uma curva experimental confiável e curvas teóricas também confiáveis, para minimizar o efeito matriz nas análises das amostras. As curvas obtidas foram minuciosamente trabalhadas: eficiência versus energia, atividade versus taxa de contagem líquida (TLC) para obter resultados analíticos mais precisos.

Essas curvas viabilizaram calcular a eficiência das emissões gama associadas a cada isótopo natural de rádio, um parâmetro fundamental para determinar a concentração de atividade nas amostras de água. O método foi executado com sucesso na análise de 109 amostras de água subterrânea provenientes de diferentes sistemas aquíferos em 34 municípios dos estados brasileiros de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. Os isótopos ^{226}Ra (emissor alfa) e ^{228}Ra (emissor beta) são habitualmente monitorados para avaliar a qualidade radiológica das águas por causa de suas meias-vidas mais longas.

Os valores máximos recomendados para ingestão em água potável, segundo as legislações brasileiras e da Organização Mundial da Saúde (OMS), são de 1 Bq/L para ^{226}Ra e 0,1 Bq/L para ^{228}Ra . Os resultados evidenciaram que seis amostras excederam o limite máximo permitido para ^{226}Ra , enquanto 41 amostras ultrapassaram o valor de referência para ^{228}Ra estabelecido pela OMS, abrangendo praticamente todas as litologias estudadas e confirmando dados reportados em investigações anteriores. Desta forma, o método descrito é eficaz para

fornecer leituras de ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra e ^{228}Ra em amostras de água com composições muito diversas, mostrando-se muito menos prolongado e mais econômico do que outras técnicas.

Os isótopos de rádio estão presentes em todos os compartimentos ambientais, com maior concentração em sistemas aquíferos, devido à interação água-rocha e aos processos geoquímicos que liberam esses isótopos para os ambientes. O rádio é absorvido pelo ser humano principalmente através da ingestão de águas e alimentos. Nos alimentos, o isótopo pode se acumular ao longo dos níveis tróficos e, no corpo humano, pode gerar diversos problemas à saúde. O radônio, produto de decaimento do rádio, ao se acumular, decai e gera os outros elementos das séries, os quais também podem estar presentes nas águas ingeridas. Quando livre, o radônio é perigoso, especialmente ao ser inalado.

REFERÊNCIAS

ABINAM – Associação Brasileira da Indústria de Águas Minerais. **Dados sobre a produção de água mineral no Brasil**. Disponível em: <https://www.abinam.org.br>. Acessado em: 1 fev. 2025.

ABRÃO, A. Química e Tecnologia das Terras-Raras. **Tecnologia Mineral**. 1994. p. 2.

ADAMS, J. A. S.; GASPARINI, P. **Gamma-ray spectrometry of rocks**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1970. p. 279.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Base cartográfica: hidrografia**. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br>. Acessado em: 29 mai. 2025.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Informações sobre concessões de lavra de água mineral**. Disponível em: <https://www.gov.br/anm>. 2024. Acessado em: 1 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Resolução nº 193, de 27 de dezembro de 2024. Consolida as especificações técnicas para o aproveitamento de águas minerais e potáveis de mesa e revoga normativos anteriores. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, p. [...] (edição de 30 dez. 2024).

AQUINO, K. A. S.; AQUINO, F. S. **Radioatividade e Meio Ambiente: os Átomos Instáveis da Natureza**. Coleção Química no Cotidiano, v 8. 2012.

BARBOSA, O. Évolution du Géosynclinal Espinhaço. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 19., 1952, Argélia. Section XII. [S.l.: s.n.], 1954. p. 2-37.

BAYES, J.C., GOMEZ, E., GARCIAS, F., CASAS, M., CERDA, V. Radium determination in mineral waters, **Appl. Radiat. Isot.** v. 47 9/10, p. 849-853, 1996.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n.º 2914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 dez. 2011. Seção 1, p. 39–46.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 157, de 3 de maio de 2024**. Dispõe sobre a rotulagem de águas minerais e potáveis de mesa envasadas. **Diário Oficial da**

União: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2024. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=458684>. Acessado em: 8 fev. 2025.

BEATO, D. A.; OLIVEIRA, F. A.; VIANA, H. S. **Projeto Circuito das Águas do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 1999.

BEERS Y. **Introduction to the theory of error, 3rd edn**. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts. 1962

BENES, P. **Migration of radium in terrestrial hydrospherein The Behavior of Radiumthe Waterways and Aquifers**, IAEA TECDOC 301, p. 117-173, Vienna, 1984.

BENES, P.; STREJC, P.; LUKAVEC, Z. Interaction of radium with fresh-water sediments and their mineral components. **1 – Ferric hydroxide and quartz. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 82, p. 275–285, 1984.

BENES, P. Interaction of radium with freshwater sediments and their mineral components. Kaolinite and montmorillonite. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 89, p. 339–351, 1985.

BETEJTIN, A. **Curso de Mineralogia**. Moscou: Editorial Mir, 1970.

BIRKS, J. B. **The Theory and Practice of Scintillation Counting**: London, Pergamon Press. p. 662, 1964.

BONOTTO, D. M. **Aplicações hidrogeoquímicas dos isótopos naturais das séries do U (4n+2) e Th (4n) no Morro de Ferro, Poços de Caldas (MG)**. 1986. Tese Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1986. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000738205>. Acessado em 23 jan. 25

BONOTTO, D.M. **Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani**. São Paulo: Editora UNESP, p. 101, 2004.

BONOTTO, D. M. Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guarani aquifer, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 329, p. 353–386, 2006.

BONOTTO, D.M.; SILVEIRA, E.G. **Geoquímica do urânio aplicada a águas minerais**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, p. 154, 2006.

BONOTTO, D. M.; BUENO, T.O.; TESSARI, B.W.; SILVA. A. The natural radioactivity in water by gross alpha and beta measurements. **Radiation Measurements**, p. 92-101, 2009.

BONOTTO, D. M. A comparative study of aquifer systems occurring at the Parana' sedimentary basin, Brazil: major hydrochemical trends. **Environmental Earth Sciences**. v. 67, p. 2285–2300, 2012.

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

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

BONOTTO, D. M. Hydrogeochemical study of spas groundwaters from southeast Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, [S.l.], v. 169, p. 60–72, 2016.

BRADY, J. E.; RUSSEL, J. W.; HOLUM, J. R. **Química: A matéria e suas transformações**. 3. ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

BROOKINS, D.G. Geochemical aspects of radioactive waste disposal. Berlin. **Springer Verlag**, p. 27-37. 1984.

CAMPOS NETO, M. DA C. **A porção ocidental da faixa Alto do Rio Grande: ensaio de evolução tectônica**. 1991. 1991. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-14102014-091400/pt-br.php>.

Acessado em 30 jan. 25.

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

CASAGRANDE, M. F. S. **Metodologia alternativa para caracterização da atividade alfa e beta total nas águas e sua aplicação em diferentes sistemas aquíferos**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/> Acessado em: 22 jan. 2025.

CASAGRANDE, M. F. S., BONOTTO, D. M. The use of γ -rays analysis by HPGe detector to assess the gross alpha and beta activities in Waters. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 137, p. 1-11, 2018.

CHU, S. Y. F.; EKSTRÖM, L. P.; FIRESTONE, R. B. **The Lund/LBNL Nuclear Data Search**. 1999. Disponível em: <http://nucleardata.nuclear.lu.se>. Acessado em: 22 jan. 2025.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. CNEN NN 3.01, Rio de Janeiro, 2014.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Posição Regulatória 3.01/012: Critérios de Potabilidade de Água para Fins de Proteção Radiológica**. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_12.pdf Acessado em: 12 fev. 25.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). (2024). **Norma CNEN NN 3.01: Requisitos básicos de proteção e segurança para fontes de radiação ionizante**. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/NormaCNENNN3.01.pdf>. Acessado em: 12 fev. 25.

CRUZ, J. V.; FRANÇA, Z. Hydrogeochemistry of thermal and mineral water springs of the Azores archipelago (Portugal). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 151, p. 382–398, 2006.

CURRIE, L. A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. **Application to Radiochemistry**. Analytical Chemistry, v. 40, n. 3, p. 586–593, 1968.

DEL REY, A. C. **Estudo hidrogeotérmico da região de Águas de Lindóia, Amparo e Socorro – nordeste do Estado de São Paulo**. 1989. Dissertação (Mestrado em geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/pos-graduacao/geofisica/publicacoes/teses-e-dissertacoes/estudo-hidrogenetico-da-regiao-de-aguas-de>. Acessado em 30 jan. 25.

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

DESIDERI, D.; ROSELLI, S.; FEDUZI, L.; MELI, M.A. Radiological characterization of drinking Waters in Central Italy. **Microchemical Journal**, v. 87, p. 13-19, 2007.

DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). **Perfil analítico do tório e terras raras**. Boletim n. 28. Rio de Janeiro, 1973, 72p.

DICKSON, B. L. Radium in groundwater. In: **The environmental behavior of radium**. TECDOC. 310. Vienna: IAEA, p. 335-372, 1990.

DORANTI-TIRITAN, C. **Evolução geomorfológica e modelagem termocinemática 3D da região do Planalto de Poços de Caldas (SP/MG)**. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/be092359-2048-4837-a1ef-17ac28f64591>. Acessado em 29 jan. 25.

DRCT NUCLEAR. **Equipamentos para proteção e monitoramento**. Disponível em: https://www.drct.com/nuclear/index.php?main_page=index&cPath=7. Acessado em: 4 jun. 2025.

DUARTE, C. R. ; BONOTTO, D. M. A radioatividade das rochas na área do projeto rio Preto (GO). **Geochimica Brasiliensis (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 14, n.2, p. 191-207, 2000.

DUARTE, C. R. **Radioelementos naturais na área do Projeto Rio Preto (GO)**. 2002. Tese Doutorado em Geociências - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2002. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/>. Acessado em: 25 jan. 25.

EISENBERG, J. M.; GREINER, W. **Nuclear Models**. Volume 1: Nuclear Theory. Amsterdam-London: North Holland Publishing Company, 1970.

EISENMANN, G. Cation selective glass electrodes and their mode of operation. **J. Biophys**, v. 2, p. 259,1962.

ELLERT, R. **Contribuição à geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas**. São Paulo: Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, 1959. Boletim n. 237, p. 5-63, 1959.

EVANS, R. D.; KIP, A. F.; MOBERG, E. G. The radium and radon content of Pacific Ocean waters, life and sediments. **Am. J. Sci.**, v. 36, p. 241-259, 1938.

FRONDEL, C. Mineralogy of thorium. U.S. Geol. **Surv. Profess. Papers**, p.300- 567, 1956.

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

GARCIA-ORELLANA, J.; RODELLAS, V.; TAMBORSKI, J.; DIEGO-FELIU, M.; VAN BEEK, P.; WEINSTEIN, Y.; CHARETTE, M.; ALORDA-KLEINGLASS, A.; MICHAEL, H. A.; STIEGLITZ, T.; SCHOLTEN, J. Radium isotopes as submarine groundwater discharge (SGD) tracers: Review and recommendations. **Earth-Science Reviews**, v. 220, 2021.

GODOY, J. M.; GODOY, M. L. Natural radioactivity in Brazilian groundwater. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 85, p. 71-83, 2006.

GASCOYONE, M. **Uranium-series disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences**. Oxford: Clarendon Press, cap.2, p.34-62, 1992.

GOLDBERG, E. D.; KOIDE, M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean. In: YOSHIOKA, H.; AHRONS, L. J.; RUNCORN, S. K. (Eds.). **Earth sciences and meteoritics**. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963. p. 90-102.

GOLDSCHMIDT, V. M. **Geochemistry**. Oxford: Clarendon Press, 1954. 730 p.

GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Elementary Particles**. New York: Wiley, 2008.

HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. (orgs.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Editora Beca, 2012. p. 331-371.

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

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources**. Vienna: IAEA, Safety Series, 1998. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf Acessado em: 26 jan. 25.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Occupational radiation protection**. Safety Guide RS-G-1.2. Vienna: IAEA, 1999.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The environmental behaviour of radium**. Vienna: IAEA, 1990. (Technical Report Series, n. 310), v. 1.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety standards for protecting people and the environment: radiation protection and safety of radiation sources**. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, Vienna: IAEA, 2011.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards**. GSR Part 3, Vienna, 2014.

ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Individual monitoring for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 54. **Annals of the ICRP**, v. 19, n. 1–3, p. 1–101, 1989.

ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. **Annals of the ICRP**, v. 36, n. 2, p. 1–170, 2006.

ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. **Annals of the ICRP**, v. 37, n. 2–4, p. 1–332, 2007. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.

ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107. **Annals of the ICRP**, v. 38, n. 3, p. 1–248, 2008.

ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. **Annals of the ICRP**, v. 41, n. 1, p. 1–320, 2012.

ICRP. **Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Members of the Public**. ICRP Publication 141, 2023.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA – IRD. **Radioproteção em radiodiagnóstico médico e odontológico**. Rio de Janeiro: CNEN, 2002. 72 p. (Coleção Segurança)

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA (IRD). **Radioatividade em Água Potável: Ocorrência, Regulamentação e Aspectos de Proteção Radiológica**. CNEN, 2011.

Disponível em: <https://www.gov.br/ird/pt-br/central-de-conteudo/publicacoes/RadioatividadeemAguaPotavel.pdf>. Acessado em: 12 fev. 25.

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

IYENGAR, M. A. R. The natural distribution of radium. In: **The enviromental behaviour of radium**, TECDOC 310. Vienna: IAEA, v. 1, p. 59-128, 1990.

JIA, Guogang; JIA, Jing. Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 106, p. 98-119, 2012.

SANTOS JÚNIOR, José Araújo dos; AMARAL, R. S.; SILVA, C. M.; MENEZES, R. S. C.; BEZERRA, J. D. **Estudo comparativo entre os detectores HPGe e NaI(Tl) na determinação de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K em amostras de solo.** Scientia Plena, v. 5, n. 4, p. 1-16, 2009.

KAPLAN, I. **Física Nuclear.** 2. ed. Tradução de Goldemberg, J. e Goldemberg, C. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company; Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983. p. 633.

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.

KOIDE, M.; BRULAND, K.; GOLDBERG, E. D. ^{226}Ra chronology of coastal marine sediment. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 31, p. 31-36 1976.

KNOL, G. F. **Radiation Detection and Measurement.** 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

KRANE, K. S. **Introductory Nuclear Physics.** New York: Wiley, 1988.

KRAUSKOPF, K. B. **Introdução à Geoquímica.** São Paulo: Polígono, 1972, v. 2.

KREIPL, M. S.; FRIEDLAND, W.; PARETZKE, H. G. Time- and space-resolved Monte Carlo study of water radiolysis for photon, electron and ion irradiation. **Radiation and Environmental Biophysics**, v. 48, n. 1, p. 11–20, 2009.

KOZLOWSKA, B.; WALENCIK, A.; DORDA, J.; PRZYLIBSKI, T.A. Uranium, radium and ^{40}K isotopes in bottled mineral waters from Outer Carpathians, Poland. **Radiation Measurements**, v. 42, p. 1380 – 1386, 2007.

KU, T. L., BROECKER, W. S. The uranium-series methods of age determination. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences.**, v.4, p. 347-379, 1976.

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

LANGMUIR, D.; REISE, A. C. The thermodynamic properties of radium. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 49, p. 1593–1601, 1985.

LAURIA, D. C.; VEIGA, L. H. S.; FRANKLIN, M. R. **Radioatividade em Água Potável**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro, RJ-2014.

LEE, J. S. et al. Radium Isotopes in the Ulsan Bay. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 82, p. 129-141. 2005.

MACHADO, F. B. **Petrologia e caracterização geoquímica das fontes mantélicas da região noroeste da província magmática do Paraná**. Tese de Doutorado. (Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/672215ee-b285-4750-95f7-39841b1513d1>. Acessado em: 27 jan. 25.

MAFRA, O. Y. - **Manual Experimental de Técnicas e Medidas Nucleares**. São Paulo, IEA, p. 141, 1970.

MANCINI, L. H.; BONOTTO, D. M. A method for evaluating ^{228}Ra in environmental matrices and its use Poços de Caldas plateau, Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**. V. 5, p. 591–600, 2002.

MANCINI, L. H.; BONOTTO, D. M. **Radium in the Hydrosphere of Brazilian Alkaline Areas**. 1. ed. New York: Nova Science Publishers, v. 1. p. 224, 2022.

MAZZILLI, B. P.; MÁDUAR, M. F.; CAMPOS, M. P. **Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo, 2013.

MCIENTÍFICA. Radithor. Disponível em: <https://blog.mcientifica.com.br/wp-content/uploads/2014/04/radithor.jpg>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MENTE, A. J. Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país. Relatório técnico n. 015. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME), Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM), jun. 2009. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448399/P07_RT15_Analise_das_Informaxes_so_bre_Recurso_Hidricos_Subterraneos.pdf/7d943b35-cde1-d984-80ba-cdf12aecff79?version=1.0. Acessado em 29 jan. 25.

MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V. **The geology of Paleozoic cratonic basins and Mesozoic interior rifts of Brazil**. In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1998, Rio de Janeiro. Short course. Coord. CARMINATTI, M. [S.l.: s.n.], 1998.

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

MILLER, James N.; MILLER, Jane C. “**Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry**”, 5th Edition, Harlow England, Pearson Prentice Hall, p. 268, 2005.

MOLINARI, J. S.; SNODGRASS, W. J. The chemistry and radiochemistry of radium and the other elements of the uranium and thorium natural decay series. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **The environmental behaviour of radium**. Vienna: IAEA, 1990. v. 1, cap. 1-2.

MONTANHEIRO, M. N. S.; FILHO V. F. N.; PINTO, F. A. **Introdução à Espectrometria Gama**. Centro de Energia Nuclear na Agricultura USP-CNEN. 1977.

MORAIS, S. M. (org.). **Integração geológica da folha Campinas SF.23-Y-A, escala 1:250.000 – Estados de São Paulo e Minas Gerais: nota explicativa**. São Paulo: CPRM, 1999. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB; Projeto de Integração Geológico-Metalogenética, folha Rio de Janeiro).

MOORE, W. S.; SHAW, T. J. Fluxes and behavior of radium isotopes, barium, and uranium in seven southeastern rivers and estuaries. **Mar. Chem.**, v. 108, p. 236–254, 2008.

NASH, J. T., GRANGER, H. C., ADAMS, S. S. Geology and concepts of genesis of important type of uranium deposits. **Econ. Geol.**, v. 75, p. 63 – 116, 1981.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OLIVEIRA, J. **Determinação de ^{226}Ra e o ^{228}Ra a em águas minerais da região de Águas da Prata.** 1993. Dissertação Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Universidade de São Paulo, 1993.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Guidelines for Drinking-water Quality.** 4th ed. Geneva: WHO, 2017.

OSTLUND, H. G.; CRAIG, H.; BROECKER, W. S.; SPENCER, D. **GEOSECS Atlantic, Pacific, and Indian Ocean Expeditions: Shore-based Data and Graphics.** International National Science Foundation, Washington, DC, v. 7, p. 200, 1987.

ORTEC (2020) Laboratory Detector Module **LDM-1.** Disponível em: <https://www.youngin.com/application/LDM-1.pdf> Acessado em: 04 jan. 25.

PARKER, J. L. **Passive nondestructive assay of nuclear materials.** Washington, DC: Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1991. (Chapters 4, 5, 6), p. 65-190). Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091470585.pdf>. Acessado em: 24 jan. 25.

Particle Data Group (PDG). Review of Particle Physics, 2024. Disponível em: <http://pdg.lbl.gov>. Acesso em: 12 fev. 2025.

PATRICIO, M.L.V. **Espectrometria gama de alta resolução aplicada na análise de radioatividade em águas devido os isótopos naturais de rádio.** 2020. Dissertação Mestrado. (Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/ae36ce61-2399-4959-88c9-8728ac306bc2>. Acessado em 18 jan. 25.

PATRICIO, M. L. V., BONOTTO, D. M. Natural radium isotopes in waters determined with gamma-ray spectrometry using a HPGe detector. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 327, p. 403-416, 2021.

PEARCE, A. Recommended Nuclear Decay Data. **NPL REPORT IR 6.** National Physical Laboratory Hampton Road, Teddington, UK, 2008. Disponível em: <https://eprintspublications.npl.co.uk/4053/1/IR6.pdf> . Acessado em 21 jan.25.

PENTREATH, R. J. Alpha-emitting nuclides in the marine environment. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 223, p. 493-501, 1984.

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

PERROTTA, M. M. **A Faixa Alto Rio Grande na região a sul de São Gonçalo do Sapucaí (MG)**. 1991. Dissertação de Mestrado (Geoquímica e Geotectônica) – IG, USP, São Paulo, 1991. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-15102015-133943/pt-br.php>. Acessado em: 30 jan. 25.

PERTLIK, F.; ROGER, J. J. N.; ADAMS, J. A. S. Uranium. In: **HandBook of Geochemistry** WEDWPOHL, K. H (ed.), Berlim: Springer Velag, 1974.

PIXABAY. **Radiação nuclear**. 2020. Disponível em: <https://pixabay.com/pt/vectors/radiação-nuclear-radioativo-5410040>. Acessado em: 4 jun. 2025.

DRCT NUCLEAR. Equipamentos para proteção e monitoramento. Disponível em: https://www.drct.com/nuclear/index.php?main_page=index&cPath=7. Acesso em: 4 jun. 2025.

PRICE, W. J. - **Nuclear Radiation Detection**. New York, McGraw Hill. P. 382, 1958.

RAMA MOORE, W. S. Using the radium quartet for evaluating groundwater input na water exchange in the salt marshes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 60, p. 4645-4652, 1996.

RANKAMA, K. **Isotope Geology**. New York: McGraw-Hill Bool Co., INC. p. 535, 1954.

RODRIGUES, J. L., KASTNER, G. F., FERREIRA A.V., Determinação de curvas de eficiência para detector HPGe em diferentes geometrias de contagem. A.V. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC, 2011, Belo Horizonte. **ABEN (Associação Brasileira de Energia Nuclear)**: ABEN, 2011. p. 1-11. Disponível em: <https://inis.iaea.org/records/3hq9-v5t36>. Acessado em 22 jan. 25.

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

RUSSO, P. A.; VO, D. T. **Gamma-ray detectors for nondestructive analysis**. [s.d.]. Disponível em: https://cdn.lanl.gov/files/1-gamma-ray-detectors_71732.pdf. Acessado em 27 jan. 25.

SÁ, J. R.; ANJOS, R. M.; CARDOSO, R. P.; MUNIZ, M. C.; CID, A. S.; LACERDA, T. C. Interação da Física das Radiações com o Cotidiano: uma prática multidisciplinar para o Ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2017.

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

SHURYAK, E. The QCD vacuum, hadrons, and the superdense matter. **Physics Reports**, v. 391, n. 2-3, p. 69-188, 2004.

SIMON, S.L.; IBRAHIM, S.A. Biological uptake of radium by terrestrial plants. In **The Environmental Behaviour of Radium**. Technical Report Series n. 310, IAEA, Vienna, v.1, 1990. The environmental behaviour of radium: Revised Edition

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

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

TAUHATA, L.; SALATI, I.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. R. **Radioproteção e Dosimetria : Fundamentos**. 9ª revisão. Instituto de Radioproteção e Dosimetria Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, IRD/CNEN. 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/centro-de-informacoes-nucleares/material-didatico-1/radioprotecao-e-dosimetria-fundamentos.pdf>. Acessado em 24 jan. 25.

TAUHATA, L.; SALATI, I.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. R. **Radioproteção e Dosimetria : Fundamentos**. 5ª revisão. Instituto de Radioproteção e Dosimetria Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, IRD/CNEN. 2003. Disponível em: https://www.ufrgs.br/fismed/pps_pdf/Radioprotecao_Dosimetria.pdf. Acessado em 24 jan. 25.

TAYLOR, S. R. Trace element abundances and the chondritic Earth model. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v. 28, p. 1989-1998, 1964.

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

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

TROUW, R. A. J.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F. V. P. **Geologia da folha Caxambu**. In: PROJETO SUL DE MINAS, Etapa I. Capítulo 3. Belo Horizonte: COMIG; UFMG; UFRJ; UERJ, 2013. p. 120.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H.; CHRISTOFIDES, S.; CHRISTODOULIDES, G. Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks. **Radiation Measurements**. v. 37, p. 221 – 229, 2003.

UNITED NATIONS. **Sources and Effects of Ionizing Radiation: Annex – Effects of Ionizing Radiation on Non-Human Biota**. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). New York: United Nations, 2008.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation: Sources**. Vol. 1. United Nations, New York, 2010.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **National primary drinking water regulations**. Washington, D.C.: USEPA, 2000.

VANDENHOVE, H.; VERREZEN, F.; LANDA, E. R. “Radium”, radionuclides in the environment, (TW. d.), Wiley, **Chichester**, p. 97–10, 2010.

VARGAS, M. J. DE SOTO, F. F. Influence of Ba on the electrodeposition of ^{226}Ra , **J. Radioanal. Nucl. Chem**. v. 198, p. 143-150, 1995.

WALECKA, J. D. **Theoretical Nuclear and Subnuclear Physics**. Singapore: World Scientific, 1995.

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

YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. **Revista Brasileira de Física Médica**. v. 3, p. 57-67, 2009.

YOSHINAGA, S. **Estudos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos das águas minerais e termais de Águas de Lindóia, SP.** 1990. Dissertação (Mestrado) – IG, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1990. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-15052014-114714/pt-br.php>.

Acessado em 30 jan. 25.

YOUNG, H. D. **Statistical treatment of experimental data.** New York: McGraw-Hill, 1962.