

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

FELIPE JUVENCIO DIAS

DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES ESPECÍFICAS
DE ^{226}Ra , ^{228}Ra , E ^{40}K EM AMOSTRAS DE AREIA
DA PRAIA DOS NAMORADOS – GUARAPARI - ES

Rio de Janeiro

2022

DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES ESPECÍFICAS DE ^{226}Ra , ^{228}Ra E
 ^{40}K NA EM AMOSTRAS DE AREIA DA PRAIA DOS NAMORADOS –
GUARAPARI - ES

Felipe Juvêncio Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, IEN-CNEN, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia Nuclear.

Orientadora: Maria de Lourdes Moreira

Rio de Janeiro

2022

DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES ESPECÍFICAS DE ^{226}Ra , ^{228}Ra E
 ^{40}K EM AMOSTRAS DE AREIA DA PRAIA DOS NAMORADOS –
GUARAPARI - ES

Felipe Juvêncio Dias

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO
INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA NUCLEARES.

Aprovado por:

Prof. Maria de Lourdes Moreira, D.Sc.

Prof. César Marques Salgado, D. Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

*Dedico esse trabalho aos meus pais,
Por todo amor, incentivo e apoio.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e pela minha saúde.

A minha querida família que me inspirou e me apoiou em todos os momentos, meus queridos pais Maria das Neves Tavares Dias e José Juvêncio Dias.

Ao meu filho Davi Santos Dias, minha inspiração.

A minha digníssima companheira Ana Cleide Camilo de Souza, por me apoiar em todos os momentos.

A minha orientadora professora Maria de Lourdes (Malu), pelo acolhimento e apoio.

Ao professor Ademir Xavier por permitir o acesso e o uso do detector em seu laboratório.

Ao meu amigo Alessandro Mariano Domingues por toda ajuda e apoio e pelas importantíssimas dicas que deram andamento a esse trabalho.

Ao meu amigo Ricardo Garcez pela importantíssima ajuda nas contagens e coleta de dados.

A todos os professores e colaboradores do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), que ajudaram nos momentos de aprendizagem e de burocracia.

Aos meus amigos de turma que eu ganhei nessa caminhada, e pelas ideias compartilhadas.

Aos membros da banca de avaliação por disponibilizarem um tempo para uma importantíssima etapa da minha vida.

“A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo de busca. E ensinar e aprender não pode dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria.”

Paulo Freire

Determinação das atividades específicas do ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K em amostras de areia da Praia dos Namorados- Guarapari - ES

Felipe Juvêncio Dias

Maio/2022

Orientadora: Maria de Lourdes Moreira

Curso: Ciência e Tecnologia em Engenharia Nuclear

RESUMO

Neste trabalho determinou-se as concentrações de atividades e as estimativas de dose absorvida e de dose efetiva dos radionuclídeos: rádio-226 (^{226}Ra), rádio-228 (^{228}Ra) e do potássio-40 (^{40}K) em amostras de areia da Praia dos Namorados, localizada no município de Guarapari - ES. Utilizou-se um detector do tipo Germânio Hiper-puro (HPGe), e o pacote de *software* LabSOCS (*Laboratory Sourceless Calibration Software*), para detecção de raios gama e, por simulação computacional o levantamento da curva de eficiência. Concluiu-se que apesar da amostra G3 apresentar valores altos de concentração de atividade e de doses absorvidas e efetivas em comparação com as amostras G1 e G2, a estimativa de dose efetiva da amostra G3 não ultrapassou o valor de estimativa global de dose efetiva natural, 76,6%. Os resultados apresentados correspondem apenas aos pontos onde as amostras foram retiradas, nada pode-se afirmar sobre suas vizinhanças.

Palavras-chave: detecção, espectrometria gama, concentração de atividade, estimativa de dose.

Abstract of Dissertation presented to IEN/CNEM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Felipe Juvêncio Dias

March/2022

Advisor: Maria de Lourdes Moreira

Course: Science and Technology in Nuclear Engineering

ABSTRACT

In this work, activity concentrations and estimates of absorbed dose and effective dose of radionuclides were determined: radium-226 (^{226}Ra), radium-228 (^{228}Ra) and potassium-40 (^{40}K) in sand samples from Praia dos Namorados, located in the municipality of Guarapari - ES. A Hyper-Pure Germanium (HPGe) type detector and the LabSOCS software package (Laboratory Sourceless Calibration Software) were used to detect gamma rays and, by computer simulation, the survey of the efficiency curve. It was concluded that although the G3 sample presented high values of activity concentration and of absorbed and effective doses in comparison with the G1 and G2 samples, the estimate of the effective dose of the G3 sample did not exceed the value of the global estimate of the natural effective dose, 76.6%. The results presented correspond only to the points where the samples were taken, so nothing can be said about their surroundings.

Keywords: detection, gamma spectrometry, activity concentration, dose estimation.

LISTA DE TABELAS

TABELA1: Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual.	15
TABELA 2: Abundância média dos minerais pesados nas praias de Guarapari-ES	16
TABELA 3: Abundância do Potássio natural.	21
TABELA 4: Radionuclídeos e suas respectivas energias utilizados na calibração em energia do sistema de detecção.	27
TABELA 5: Massa e densidade das amostras.	34
TABELA 6: Background associado a faixa de energia do ^{226}R , ^{228}R e do ^{40}K .	35
TABELA 7: Eficiência simulada para as faixas de energia de interesse.	35
TABELA 8: Atividade mínima detectável para as amostras da areia da Praia dos Namorados-Guarapari-ES.	36
TABELA 9: Contagem das amostras de areia da Praia dos Namorados.	36
TABELA 10: Concentração de atividade das amostras de areia da Praia dos Namorados.	37
TABELA 11: Estimativa de dose absorvida.	38
TABELA 12: Estimativa de dose anual.	38

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Série de decaimento do Urânio (^{238}U)	18
FIGURA 2: Série de decaimento do Tório (^{232}Th)	19
FIGURA 3: Equilíbrio secular	20
FIGURA 4: Praia dos Namorados-ES.	23
FIGURA 5: Amostras de areia da Praia dos Namorados-ES	24
FIGURA 6: Balança digital de precisão	24
FIGURA 7: Conjunto de detecção HPGe do LAASC	25
FIGURAS 8 e 9: Simulação do detector HPGe com as amostras	28

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
2.1 Areia	21
2.2 Radionuclídeos	23
2.3 Séries de decaimento	24
2.4 Equilíbrio secular	25
2.5 Potássio-40 (^{40}K)	28
2.6 Espectrometria gama	30
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Coleta e preparação das amostras	31
3.2 Conjunto de detecção	35
3.2.1 Calibração do sistema de detecção	36
3.2.2 Eficiência de detecção	37
3.2.3 Desvio percentual para curva de eficiência	38
3.3 Atividade específica	38
3.3.1 Correções nos valores da atividade específica	

3.3.2 Erro nos valores da atividade específica

3.3.3 Atividade mínima detectável

3.4 Estimativa de dose absorvida

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 Massas das amostras	35
4.2 Radiação de fundo (BG)	35
4.3 Eficiência simulada	36
4.4 Atividade mínima detectável	37
4.5 Contagens das amostras	37
4.6 Concentração de atividade das amostras de areia da Praia dos Namorados	38
4.7 Estimativa de dose absorvida e dose efetiva	38
4.8 Conclusão	39
4.9 Perspectivas futuras	40
4.10 Referências bibliográficas	41
APENDICE A	43

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O solo é composto por diversos tipos de elementos, sua composição depende da variação de fatores de formação, tais como, material de origem, clima, tempo, organismos vivos, eventos naturais, atividade humana, dentre outros. Dependendo da variação de fatores, podem surgir concentrações de elementos radioativos e conseqüentemente áreas de anomalia radiométrica [1].

O Brasil possui áreas que possuem alta concentração de urânio, tório, potássio 40 e outros elementos, possui a quinta maior reserva catalogada de urânio do mundo [2], sabe-se que 309.000 toneladas do minério ocorrem em regiões dentro de 4 estados: Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais. A estimativa é que a ocorrência desses minérios seja ainda maior, uma vez que apenas 1/3 do território foi catalogada [3]. Os principais depósitos de Tório no Brasil estão localizados no Espírito Santo, Bahia, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraná [4] e as reservas de potássio catalogadas atualmente estão localizadas nos estados de Sergipe e do Amazonas [5].

Localizada numa importante região de anomalia radiométrica do litoral brasileiro, a pequena Praia dos Namorados com seus 75 metros de extensão, vizinha da Praia das Castanheiras e da Praia da Areia Preta é um destino bastante procurado pelos turistas que visitam Guarapari, no estado do Espírito Santo. Por sua localização e por ser um local bem frequentado, a Praia dos Namorados foi o local escolhido para o levantamento dos dados deste trabalho. O Espírito Santo apresenta uma extensa área de anomalia radiométrica que se estende desde o litoral do Rio de Janeiro até o litoral do estado da Bahia, com elevada concentração de terras raras, além de tório. Um dos responsáveis por tal condição é a presença do mineral monazita [6].

A exposição à radiação pode ser classificada de acordo com sua origem, em dois grupos principais:

- Artificial ou antropogênica: decorrentes de aplicações médicas nucleares, acidentes radiológicos, *fall-out* originado em acidentes nucleares, exposição ocupacional, dentre outros.

- Natural: subdividida em radiação cósmica (partículas de alta energia que continuamente bombardeiam o planeta) e a radiação terrestre (oriunda dos radionuclídeos primordiais e outros pertencentes a sua cadeia de decaimento radioativo), [7].

A estimativa de dose efetiva devido a fontes naturais de radiação é de 2,42 *mSv/ano* [8]. A Tabela 1 traz a proporção da contribuição de cada agente natural.

Tabela 1: Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual. Fonte: UNSCEAR 2000.

Componente da exposição	Dose efetiva anual (mSv)
Raios cósmicos e radionuclídeos cosmogênicos	0,39
Radionuclídeos terrestres: exposição gama externa	0,48
Radionuclídeos no corpo: exposição interna (exceto radônio)	0,29
Radônio e filhos	1,26
Total	2,42

O objetivo desse trabalho é determinar a concentração de atividade do rádio-226, rádio-228 e do potássio-40 em amostras tiradas em pontos específicos da faixa de areia da Praia dos Namorados. Utilizou-se um detector de Germânio Hiperpuro (HPGe) do Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional (LAASC) do Programa de Engenharia nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em colaboração, para obtenção dos dados, e a técnica de espectrometria gama para a determinação das concentrações. Os resultados obtidos contribuem para aumentar a riqueza da literatura, ao passar do tempo as medições podem ser refeitas observando se há variações.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Areia

A areia monazítica é um tipo de areia composta por uma concentração elevada de minerais pesados, geralmente são encontradas no litoral e em rios. A Praia da Areia Preta, por exemplo, soma na composição de sua areia 80% de monazita e zircão sendo assim considerada uma anomalia em termos de concentração desses minerais, além de apresentar mais de 35% (média de 17%) de minerais pesados em relação aos leves [9,10] esses fatores seriam responsáveis pelo alto nível de radioatividade na região. A Tabela 2 mostra a abundância média dos minerais que compõe as areias das praias de Guarapari.

Tabela 2: Abundância média dos minerais pesados nas praias de Guarapari.

Abundância média de minerais pesados	(%)
Sillimanita	35,2
Zircão	22,8
Andaluzita	14,5
Rutilo	7,4
Monazita	6,2
Cianita	3,2
Titanita	2,7
Granada	1,5

Com concentrações menores do que 1% em média, encontra-se a apatita, ferrossilita, hornblenda, anatásio, e agregados mineralóides de leucoxênio e limonita[10].

2.2 Radionuclídeos

Os radionuclídeos são elementos químicos que emitem radiação capaz de ionizar o meio que interagem, os principais elementos radioativos estão entre os elementos mais pesados, ou seja, maior massa atômica [11], eles se desintegram emitindo partículas e energia, no campo da detecção gama são identificados pela energia característica de seus fótons. A soma de todas as formas de radiação, seja natural e/ou artificial encontrada no meio ambiente é definida no campo da detecção como *background* [8], é importante saber quando esses níveis de radiação natural estão alto, pois, contribuem diretamente para a taxa de dose absorvida e conseqüentemente para o risco de danos à saúde.

2.3 Série de decaimento

O decaimento dos elementos primordiais Urânio, Tório e o Potássio são os principais responsáveis pela irradiação do corpo humano através da radiação gama. Os danos à saúde provocados pela radiação, dependem da concentração e do tempo de exposição à fonte de radiação ionizante.

Quase todos os elementos radioativos encontrados naturalmente, pertencem a três principais cadeias de decaimento, a do Urânio, a do Actínio e a do Tório, a série mais extensa é a do ^{238}U , esse elemento tem uma abundância isotópica de 99,27% e um tempo de meia vida de 4,46 bilhões de anos (Figura 1) [2].

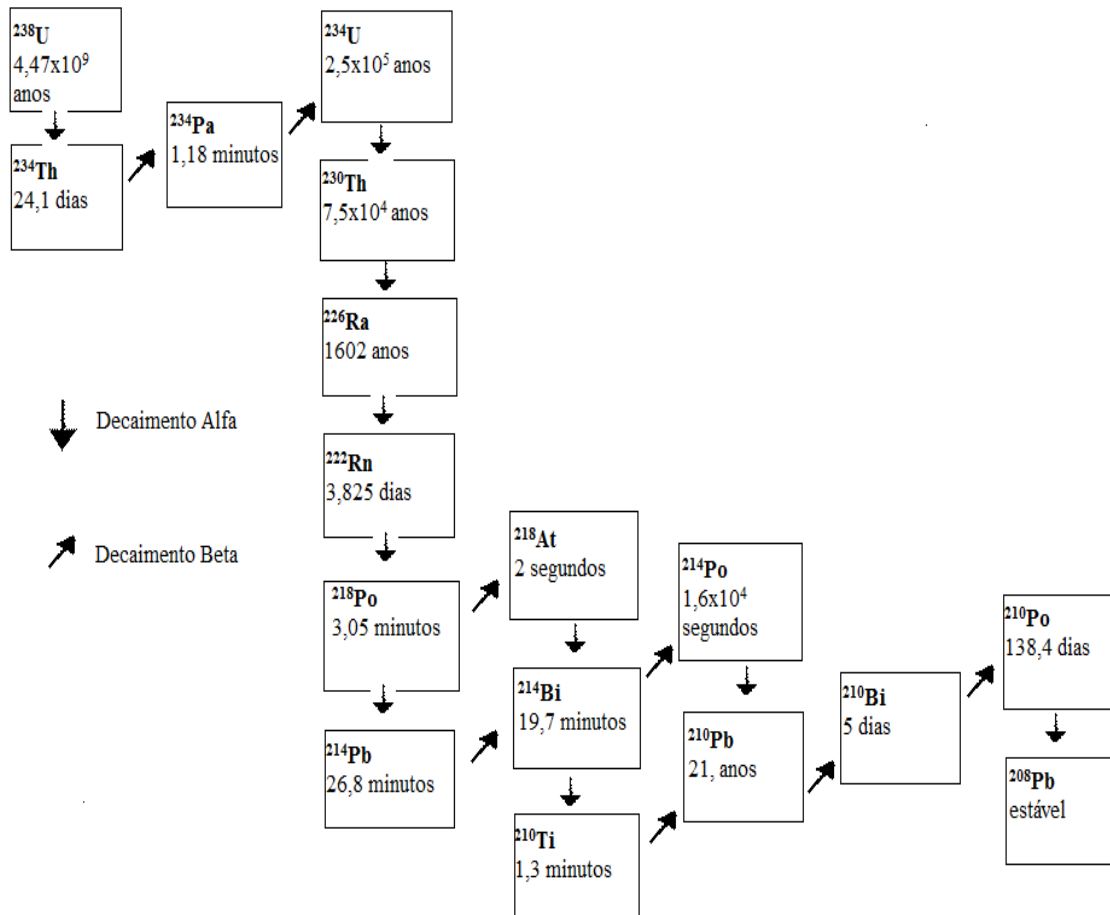


Figura 1: Série de decaimento do urânio-238 (^{238}U).

O tório-232 (^{232}Th) tem uma abundância natural de 100% e uma meia vida de 14,05 bilhões de anos. Podemos observar a série de decaimento do ^{232}Th na Figura 2.

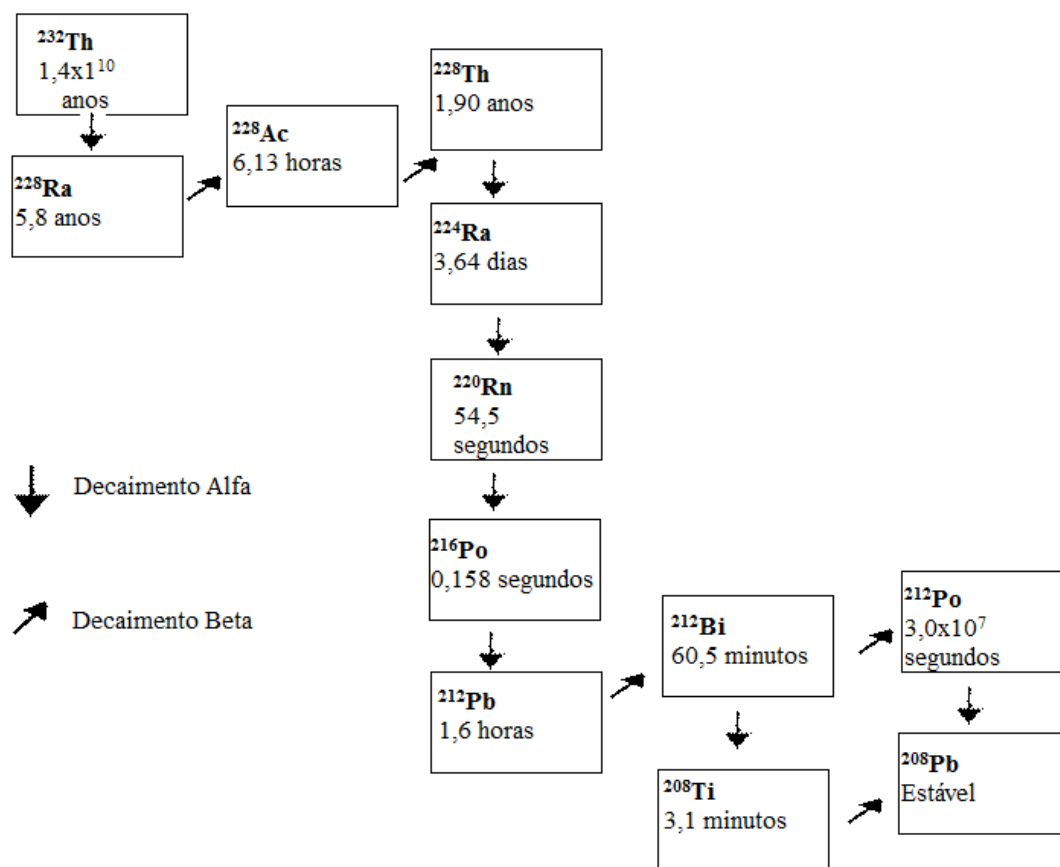


Figura 2: Série de decaimento do tório-232 (^{232}Th).

Observando as séries de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th , percebemos que os radionuclídeos de interesse desse trabalho, o rádio-226 (^{226}Ra) e o rádio-228 (^{228}Ra), são produtos do decaimento ou radionuclídeos filhos desses radionuclídeos primordiais, sendo, o ^{226}Ra produto do decaimento do ^{238}U e o ^{228}Ra produto do decaimento do ^{232}Th .

2.4 Equilíbrio secular

As séries radioativas naturais possuem nuclídeos com propriedades físicas e químicas diferentes e com uma grande variação em suas meias vidas, por isso quando se estuda decaimento em série, o equilíbrio secular é um evento importante a ser considerado, pois

garante que os elementos pertencentes a uma determinada série de decaimento contidos na amostra tenham a mesma atividade do elemento que dá origem a série, desde que estejam num sistema fechado[12]. O tempo necessário para que um sistema fechado contendo inicialmente os nuclídeos pais de cada série natural de decaimento atinja 98,5% do equilíbrio secular é cerca de seis vezes a meia-vida do radionuclídeo filho de menor constante de decaimento [13]. A Figura 3 apresenta: A curva (a), que mostra o aumento da quantidade do número de átomos filho, até atingir o número de átomos igual do nuclídeo pai (b). A curva (c), que representa a atividade total da amostra e a curva (d), que mostra uma fração do nuclídeo filho e seu decaimento.

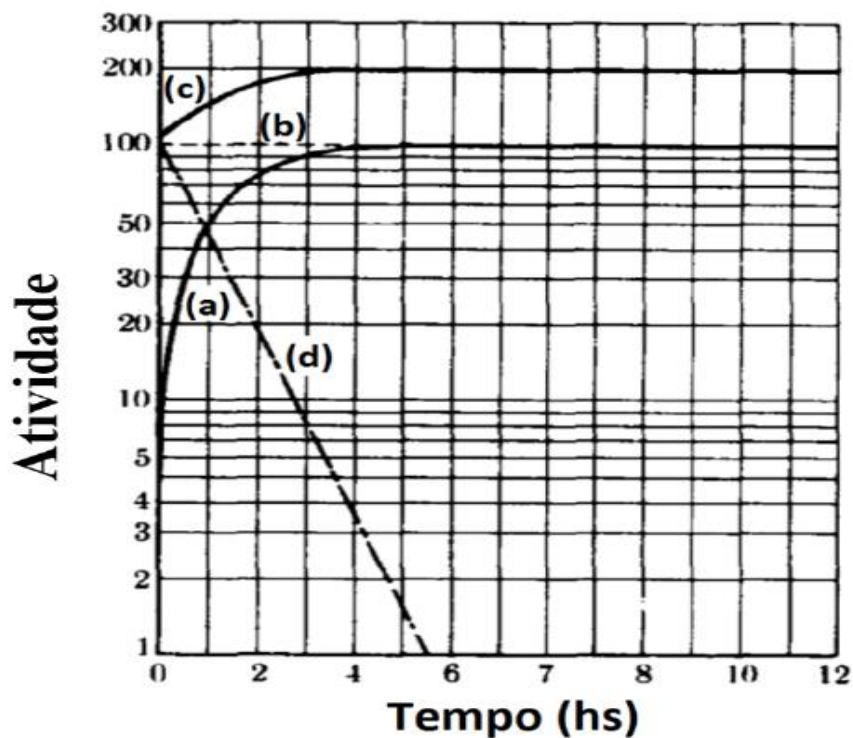


Figura 3: Equilíbrio secular [14].

2.5 Potássio-40 (^{40}K)

O Potássio, possui três radionuclídeos naturais, o potássio-39 com uma abundância de 93,26% que é estável, o potássio-40 com uma abundância de 0,01% que é instável e o potássio-41 com uma abundância de 6,73% que é estável, Tabela 3 [15].

Tabela 3: Abundância do Potássio natural.

Elemento	Abundância
^{39}K	93,26%
^{40}K	0,01%
^{41}K	6,73%

O ^{40}K é o radionuclídeo mais significativo que existe, isto porque ele é encontrado em praticamente todas as amostras ambientais, sendo que na maioria de amostra de solo ele é encontrado em alto nível [15]. A sua meia vida é de 1,26 bilhões de anos [16]. O Potássio é o sétimo elemento mais comum encontrado no solo com uma atividade média específica de 850 *Bq/Kg*.

2.6 Espectrometria gama

A espectrometria gama é uma técnica que utiliza a contagem de fótons emitidos pelos radionuclídeos, captados por um detector, distribuídos em canais de energia que os caracterizam, ajudando em suas identificações. É uma técnica bem difundida na radiometria, por ser uma técnica não destrutiva, garantindo a integridade das amostras e evitando a perda de tempo com tratamentos químicos ou algum processo rigoroso de

separação física. Permite identificar e quantificar as concentrações dos radionuclídeos emissores de radiação gama presentes em uma amostra.

Para análises ambientais os detectores mais utilizados são os cintiladores, exemplo o NaI (TI), e os semicondutores, exemplo o HPGGe. Em comparação, o primeiro possui uma eficiência de detecção maior e o segundo uma melhor resolução em energia [15]. Em análises ambientais os detectores semicondutores são uma melhor alternativa, por possuírem uma menor flutuação estatística, menor nível de ruído e uma maior resolução em energia, o que é importante porque as amostras ambientais podem apresentar um leque muito amplo de radionuclídeos, o que facilita identificar um número maior de elementos [17].

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta e preparação das amostras

A coleta das amostras de areia da Praia dos Namorados ocorreu no dia 08/01/2020 em três pontos da faixa de areia, (Figura 4), G1 (P1 = -20,671563; -40,495485), G2 (P2 = -20,671352; -40,495063) e G3 (P3 = -20,671679; -40,494989), a uma profundidade de 15cm em relação a superfície, afim de evitar excessos de impurezas.



Figura 4: Praia dos Namorados-ES.

As amostras foram armazenadas em potes plásticos identificados (Figura 5), envoltos com papel PVC e lacrados com fita adesiva, criando um ambiente fechado, onde após um período de um ano e meio foram postas para contagem no detector.



Figura 5: Amostras de areia da Praia dos Namorados-ES.

Uma vez no laboratório, as massas das amostras foram aferidas utilizando-se uma balança digital de precisão (Figura 6) da marca Gehaka, modelo BG 4000, com resolução de centésimos de gramas e um erro intrínseco de 0,01 g.



Figura 6: Balança digital de precisão.

3.2 Conjunto de detecção

O detector utilizado para obter as contagens das amostras pertence ao Laboratório de Análise Ambiental e Simulação Computacional (LAASC) da COPPE/UFRJ. É um detector do tipo semiconductor Germânio Hiperpuro (Figura 7) vertical da marca Camberra, modelo GC3020, com eficiência relativa de 30%. O detector possui uma blindagem da marca Camberra, modelo 747E, com uma espessura de 10,16 cm de chumbo com a parte interna revestida por 1mm de estanho que, por sua vez, também é revestido por 1,6mm de cobre. A blindagem é revestida por fora por uma camada de 9,5mm de aço com baixa porcentagem de carbono. Possui um pré-amplificador acoplado ao detector resfriado por nitrogênio líquido, do tipo RC, modelo 2002C. O criostato que envolve o cristal é do modelo 7500SL, e o *dewer* tem capacidade de 30 litros de armazenamento. O sistema multicanal utilizado foi o DAS 1000 (*Digital Spectrum Analyzer*) com tecnologia DSP (*Digital Signal Processor*), com 8192 canais, com faixas de energia de 50 KeV até 2MeV [2].



Figura 7: Conjunto de detecção HPGe do LAASC.

Para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos através do detector, devemos considerar alguns parâmetros importantes:

- 1- Eficiência de contagem por energia do fóton;
- 2- Boa calibração do sistema de medidas;
- 3- Boa resolução do sistema por fotopico;
- 4- Baixo limite de detecção;
- 5- Um sistema que forneça o cálculo da área líquida do fotopico;
- 6- Um arranjo experimental que permita validar os resultados experimentais com a utilização de padrões certificados, e
- 7- Minimização do auto absorção pelo uso de padrões com densidades semelhantes às amostras analisadas e padronização das massas das amostras analisadas, dos padrões e do tempo de aquisição [2].

3.2.1 Calibração do sistema de detecção

A calibração do sistema de detecção foi realizada com o auxílio do programa Gamma Analysis do Genie 2000, que ficou responsável pelo controle e armazenamento de dados adquiridos pelo multicanal (DAS 1000), que em sua função faz um ajuste linear quando duas linhas de energia são definidas e um ajuste quadrático se três ou mais linhas de energia forem definidas. Dessa maneira a calibração em energia do sistema foi feita utilizando fontes radioativas certificadas, totalizando um número de 16 pontos experimentais que correspondem aos picos energéticos dos radionuclídeos (Tabela 4) [12].

Tabela 4: Radionuclídeos e suas respectivas energias utilizados na calibração em energia do sistema de detecção.

Radionuclídeos	Energias (KeV)
^{241}Am	59,5
^{155}Eu	86,5 — 105,3
^{137}Cs	661,7
^{54}Mn	834,8
^{133}Ba	80,9 — 276,4 — 302,8 — 356,0 — 383,8
^{65}Zn	1115,6
^{40}K	1406,8
^{22}Na	511 — 1274,5
^{60}Co	1173,2 — 1332,5

3.2.2 Eficiência de detecção

A eficiência de detecção para os níveis de energia de interesse, nesse caso 609 keV para o ^{226}Ra , 911keV para o ^{228}Ra e 1440 keV para o ^{40}K , foi feita utilizando o pacote de programas LabSOCS (*Laboratory Sourceless Calibration Software*) da Camberra. A modelagem geométrica das amostras e seus contêineres tiveram que ser inseridos num ambiente computacional para ser feita a simulação, bem como as suas propriedades físicas e químicas (Figuras 8 e 9).

Após a modelagem o programa divide toda a região, porta amostra e amostra, em 1024 *voxels* com energias pré-definidas (45, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000, 1400 e 2000) keV e de forma aleatória escolhe um ponto em cada *voxel* calculando então a eficiência de detecção a partir dos valores encontrados. Depois o programa dobra o

número de *voxels* e faz todo o processo novamente, e obedecendo a critérios de convergência compara os valores. Caso os valores de eficiência simulados não convirjam, o número de *voxels* é dobrado novamente até obter a convergência satisfatória. Uma vantagem do programa de simulação é que a correção devido ao efeito de auto atenuação da radiação gama já é feito diretamente pelo programa, e não há necessidade de utilizar fatores de correção[12].

As Figuras 8 e 9, mostram o desenho da simulação produzido pelo pacote de programas, o qual observamos a amostra e o pote que a contém destacados em vermelho em cima do detector destacado em verde.



Figuras 8 e 9: Simulação do detector HPGe com a amostra.

3.2.3 Desvio percentual para curva de eficiência

O desvio percentual para a curva de eficiência absoluta é calculado pelo software Genie 2000, que usa a curva de ajuste e o resultado da eficiência simulada (Equação 3.1). O desvio não excede a faixa de erro apresentado para cada faixa de energia, sendo assim, não contribui para resultados equivocados.

$$Desvio = \left| \frac{E_{Simulada} - E_{Ajuste}}{E_{Simulada}} \right| \times 100 \quad \text{Eq. (3.1)}$$

3.3 Atividade específica

Uma medida importante a ser levada em conta quando trabalha-se com detecção é a radiação de fundo (Background), que interfere diretamente na coleta de dados (contagem). Antes de qualquer tipo de amostra ser posta para contagem deve-se primeiro verificar o nível de radiação de fundo, e depois da contagem feita fazer a diferença obtendo assim o valor absoluto. O valor absoluto das contagens é o resultado da diferença entre a contagem “bruta” e a radiação de fundo, *Background* (BG), dessa forma:

$$C = C_{bruta} - BG \quad \text{(Eq. 3.2)}$$

Onde:

C = contagem absoluta;

C_{bruta} = contagem bruta;

BG = radiação de fundo.

O pacote de programa LabSOCS (*Laboratory Sourceles Calibration Software*) da Camberra faz essa conta automaticamente nos fornecendo o resultado pronto, isso ajuda na rapidez da análise de amostras. O tempo para fazer o levantamento do Background deve ser o mesmo da contagem das amostras, no nosso caso 25200 segundos.

Quando se obtém o espectro gama de uma amostra, identifica-se as linhas gamas dos radionuclídeos emissores que estão presentes nas amostras através da calibração em

energia e então quantifica-se suas atividades específicas. Para isso utiliza-se a equação (3.3) e seus parâmetros [9]:

$$A_{esp} = \frac{N_L}{\varepsilon m t P_\gamma} \quad \text{Eq.(3.3)}$$

Onde:

A_{esp} = atividade específica do radionuclídeo por unidade de massa da amostra, dado em $Bq.Kg^{-1}$;

N_L = área líquida sob o fotopico;

ε = eficiência de contagem para uma energia específica (γ);

m = massa da amostra em quilograma;

t = tempo de contagem em segundos e

P_γ = probabilidade de emissão do raio gama.

A quantidade total de contagens sob a área do pico de interesse deve ter descontado o fundo Compton e o background (porta amostra + blindagem), afim de se obter a área líquida de contagem (N_L). Há uma cadeia de dependência na qual o número de contagem depende da eficiência de detecção (ε), que também depende da energia dos fótons. É importante sempre preservar a geometria das amostras porque a quantidade de radiação que chega no detector depende diretamente das dimensões e das densidades das amostras, por isso as amostras estão armazenadas em potes idênticos e são sempre dispostas na mesma posição no detector [12].

3.3.1 Correções nas atividades específicas

Para obter valores com uma maior precisão possível, se faz necessário algumas correções nos valores das atividades específicas. Algumas dessas correções são feitas pelo programa Genie 2000. A correção intrínseca, é a correção devido à auto atenuação dos fótons na amostra e no porta-amostras, essa correção já é feita assim que a curva de

eficiência é gerada pelo software LabSOCS. Outra correção é feita pelo *Gamma Analysis Software*, devido ao efeito soma-coincidência, que ocorre quando um elemento radioativo emite dois fótons num curto intervalo de tempo, fazendo com que a eletrônica do detector não consiga distingui-los registrando assim um único fóton. Outra correção feita pelo *Gamma Analysis Software* é feita na curva de eficiência de detecção, baseia-se nas áreas líquidas de cada pico.

3.3.2 Erro dos valores na atividade específica

O erro associado a equação pode ser estimado utilizando a propagação de erros apresentado na equação a seguir [12]:

$$\delta A = \sqrt{\frac{\delta N_L^2}{(m \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + N_L^2 \left(\frac{\delta \varepsilon^2}{(m \cdot \varepsilon^2 \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + \frac{\delta m^2}{(m^2 \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + \frac{\delta t^2}{(m \cdot \varepsilon \cdot t^2 \cdot P_\gamma)^2} \right)} \quad \text{Eq.(3.4)}$$

Onde:

δA = Incerteza na atividade específica;

δN_L = Incerteza na área do fotopico;

$\delta \varepsilon$ = Incerteza na eficiência de detecção;

δm = Incerteza na massa das amostras (considerada absoluta);

δt = Incerteza no tempo de aquisição do espectro gama (considerado absoluto) e

δP_γ = Incerteza na probabilidade de emissão (considerada absoluta).

3.3.3 Atividade mínima detectável (AMD)

O cálculo de atividade mínima detectável por unidade de massa de uma amostra para uma dada linha de emissão gama com certo nível de confiança definido pelo coeficiente k, é usualmente baseado na derivação de *Currie*, e está de acordo com as normas ISO 11929

e 10703. O cálculo da atividade mínima detectável que também é calculado automaticamente pelo programa é expresso da seguinte maneira [12]:

$$AMD_{(Bq/Kg)} = \frac{k^2 + \sqrt{8}.k.\sigma}{P_\gamma.t(s).m(Kg).\varepsilon} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Onde:

(σ) é o desvio padrão da radiação de fundo da blindagem mais o porta-amostras medido por um tempo (t), o mesmo tempo para a aquisição do espectro;

(m) É o valor da massa da amostra;

(P_γ) É a probabilidade de emissão de uma certa energia;

(ε) É a eficiência de detecção para esta energia e

(k) É o nível de confiança que está relacionado ao percentual de medidas que estará fora de um intervalo definido a partir do valor médio.

3.4 Estimativas de doses absorvida e efetiva

As atividades específicas obtidas podem ser convertidas em doses utilizando-se a equação (3.5) e os seguintes fatores 0,462, 0,604 e 0,0417 respectivamente[8,18]. Esses fatores foram utilizados para calcular a taxa de dose gama absorvida no ar a 1m acima do nível do mar.

$$D = 0,462C_{R_{226}} + 0,604C_{R_{228}} + 0,0417C_{K_{40}} \quad \text{Eq.(3.6) [2]}$$

Onde:

D é a dose absorvida medida em nGy/h. $C_{R_{226}}$, $C_{R_{228}}$ e $C_{K_{40}}$ são as concentrações de atividades em Bq/Kg para os radionuclídeos analisados. E a estimativa da dose anual efetiva é calculada através da equação (3.6).

$$E = D * EXP * f * j \quad \text{Eq.(3.7) [2]}$$

Onde:

(E) é a dose efetiva anual dada em Sv/ano, (EXP) é o termo referente ao tempo de exposição, em h/ano, (f) é o fator de conversão de Sv/Gy para a dose absorvida no ar, estimado em 0,7 e (j) é o fator para a estimativa da dose efetiva indoor e outdoor, baseada na exposição em ambientes fechados e abertos [2]. Os fatores para a estimativa da dose efetiva indoor e outdoor foi de 0,8 e 0,2 respectivamente[8].

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Massas das amostras

Inicialmente aferiu-se as massas das amostras utilizando-se uma balança (seção 3.1 do capítulo 3), logo em seguida o resultado das suas densidades, obtidas através da Eq. (4.1), cujo os resultados estão expressos na Tabela 5. As densidades das amostras foram utilizadas para modelar a simulação para obtenção da curva de eficiência.

$$D_{Densidade} = \frac{M_{massa\ da\ amostra}}{V_{volume\ do\ pote}}. \quad Eq.(4.1)$$

O volume do pote é de 250 ml.

Tabela 5: Massa e densidade das amostras.

Amostras	Massa (g)	Densidade $\left(\frac{g}{ml}\right)$
G1	307,17 ± 0,01	1,2287
G2	278,19 ± 0,01	1,1128
G3	357,90 ± 0,01	1,4316

4.2 Radiação de fundo (BG)

Como dito na seção 2.2, pode-se identificar um radionuclídeo pela energia dos seus fótons, porém, é importante identificar o excesso dessa energia, *background*, no ambiente em que se faz as contagens das amostras, afim de se obter o valor absoluto das contagens.

Assim, o *background* obtido para as faixas de energia de 609 keV, 911 keV e 1440 keV, que correspondem aos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K , foram: 2 keV, 0 keV e 5 keV respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6: Background associado a faixa de energia do ^{226}Ra , ^{228}Ra e do ^{40}K .

Faixa de Energia (KeV)	BG (KeV)
609	2
911	0
1460	5

4.3 Eficiência simulada

Após uma modelagem computacional, onde foram inseridas as características físicas e químicas do arranjo experimental, ou seja, amostras e recipientes, com o auxílio do programa LabSOCS, obteve-se o resultado da simulação da eficiência do detector HPGe para as faixas de energia correspondentes aos radionuclídeos de interesse (Tabela 7).

Tabela 7: Eficiência simulada para as faixas de energia de interesse.

Faixa de Energia (keV)	Eficiência Simulada
609	$0,01566 \pm 0,00063$
911	$0,01156 \pm 0,00058$
1460	$0,00809 \pm 0,00049$

4.4 Atividade mínima detectável

A atividade mínima detectável (AMD) (ver seção 3.6.3), foi obtida usando os mesmos parâmetros da eficiência do detector (seção anterior), resultado da simulação e calculada pelo programa LabSOCS (Tabela 8).

Tabela 8: Atividade mínima detectável para as amostras da areia da Praia dos Namorados-Guarapari-ES.

AMOSTRA	ATIVIDADE MÍNIMA DETECTÁVEL (AMD) KeV ²²⁶ Ra	ATIVIDADE MÍNIMA DETECTÁVEL (AMD) KeV ²²⁸ Ra	ATIVIDADE MÍNIMA DETECTÁVEL (AMD) KeV ⁴⁰ K
G1	4,9	3,8	8,6
G2	5,0	3,8	8,9
G3	4,8	3,8	8,3

4.5 Contagens das amostras

As amostras de solo da Praia dos Namorados ficaram contando pelo tempo de 25.200 segundos, o que correspondem a 7 horas, e o número de eventos para cada nuclídeo está disposto na Tabela 9.

Tabela 9: Contagem das amostras da areia da Praia dos Namorados.

Amostras	Contagens 609 keV	Contagens 911 keV	Contagens 1440 keV
G1	804 ± 28	2996 ± 55	149 ± 12
G2	101 ± 10	280 ± 17	23 ± 15
G3	11415 ± 107	55577 ± 236	1026 ± 32

4.6 Concentração de atividade das amostras

Para calcular a concentração de atividade (Eq. (3.3)), é preciso saber: a probabilidade de emissão de cada radionuclídeo, sendo: 45,49% de probabilidade de emissão para o ^{226}Ra , 25,80% para o ^{228}Ra e 10,66% para o ^{40}K , juntamente com as contagens e o tempo de contagem das amostras (seção anterior), as massas das amostras (Tabela 5), e a eficiência de detecção para cada faixa de energia (Tabela 7). Como resultado (Tabela 10) obteve-se:

Tabela10: Concentração de atividade das amostras da areia da Praia dos Namorados.

AMOSTRAS	^{226}Ra (Bq/kg)	^{228}Ra (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
G1	$14,9 \pm 0,5$	$133,4 \pm 2,4$	$24,0 \pm 1,9$
G2	*	$14,9 \pm 0,8$	$41,4 \pm 2,6$
G3	$182,6 \pm 1,7$	$2295,7 \pm 9,0$	$145,9 \pm 4,2$

*valor abaixo da atividade mínima de detecção.

4.7 Estimativas de dose absorvida e dose efetiva

As concentrações de atividades do ^{226}Ra , do ^{228}Ra e do ^{40}K da seção anterior, foram convertidas em dose absorvida utilizando a Eq. 3.6 da seção 3.4, aplicando os valores de conversão usados para calcular a taxa de dose gama absorvida no ar a 1 metro acima do nível do solo (Tabela 11).

Tabela 11: Estimativa de dose absorvida.

Amostras	Dose Absorvida (nGy/h)
G1	88,45
G2	10,73
G3	1477,05

A dose efetiva foi estimada usando a Eq. 3.7 da seção 3.4, utilizando os fatores de conversão 0,7 Sv/Gy e de estimativa de dose para ambientes abertos 0,2 e considerando o tempo de exposição de 1 hora (Tabela 12).

Tabela 12: Estimativa de dose efetiva.

Amostras	Estimativa de dose efetiva (μ Sv/h)
G1	0,012
G2	0,001
G3	0,203

4.8 Conclusão

Através da técnica de espectrometria gama, foi possível determinar as concentrações de atividades dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e do ^{40}K nas amostras de areia da Praia dos Namorados. As concentrações de atividades dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e do ^{40}K apresentaram maiores valores na amostra G3: 182,6 Bq/kg, 2295,7 Bq/kg e 145,9 Bq/kg respectivamente. Na amostra dois, não foi possível detectar a atividade do ^{226}Ra , o valor ficou abaixo do limite de detecção. As estimativas de dose absorvida para as amostras G1, G2 e G3 ficaram em: 88,45 nGy/h, 10,73 nGy/h e 1477,05 nGy/h respectivamente. E as estimativas de dose efetiva para as amostras G1, G2 e G3 ficaram em: 0,012 μ Sv/h, 0,001 μ Sv/h e 0,203 μ Sv/h respectivamente. E como era de se esperar, os valores de dose

absorvida 1477,05 nGy/h e dose efetiva 0,203 $\mu\text{Sv/h}$ da amostra G3, apresentaram valores maiores devido a maior concentração de atividade entre as amostras.

A estimativa de dose natural anual é de 2,42 mSv/ano (ver introdução), convertendo o valor de mSv/ano para $\mu\text{Sv/h}$, temos 0,276 $\mu\text{Sv/h}$, e fazendo uma comparação com a maior estimativa de dose efetiva que foi de 0,203 $\mu\text{Sv/h}$ para amostra G3, observa-se que a estimativa da amostra G3 ficou a 76,6% desse valor. Isso significa que para uma pessoa receber 76,6% da dose natural devido a amostra G3, ela precisaria ficar 24 horas por dia o ano todo no ponto onde a amostra G3 foi retirada.

As concentrações de atividades e as estimativas de doses apresentadas neste trabalho, não são válidas para toda a faixa de areia da Praia dos Namorados, ficam restritas aos pontos onde as amostras foram retiradas.

4.9 Perspectivas futuras

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja feito um levantamento da concentração de atividade dos radonuclídeos aqui estudados, para toda a faixa de areia da Praia dos Namorados, pois, a concentração de atividade da amostra G3 apresentou um valor considerável, porém, o resultado só diz respeito aquele ponto em que ela foi coletada, nada podemos afirmar sobre as vizinhanças dos pontos de coletas das amostras. Seria interessante investigar se ao longo da faixa de areia há alguma variação importante desse valor, pois, a Praia dos Namorados é um local público bastante frequentado, principalmente na alta temporada, talvez seja de interesse da comunidade científica saber se os frequentadores dessa praia correm riscos de altas taxas de doses de radiação natural daquele local.

4.10 Referências bibliográficas

[1] REBELLO, A. M. A., BITTENCOURT, A. V. L., MANTOVANI, L. E., ROSSI, T. B., 2003, “*Pedogeochemical models on prognosis and control of radon fluxes from humid tropical landscapes over granite*”, *Environmental Geology*, v. 44, n. 2 (Jun), pp.158-168.

[2] Garcêz, Ricardo Washington Dutra. Concentração de atividade, correlação com características ambientais e mapeamento de radionuclídeos nos solos do Estado do Espírito Santo/ Ricardo Washington Dutra Garcêz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

VIII, 91 p.: il.; 29,7 cm.

[3] MME – Ministério de Minas e Energia. Disponível em:

<[http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-](http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview_file_entry&_20_redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpublicacoes-e-indicadores%2Fboletins-de-energia%3Fp_p_id%3D20%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_count%3D1%26_20_entryEnd%3D20%26_20_displayStyle%3Ddescriptive%26_20_viewEntries%3D1%26_20_viewFolders%3D1%26_20_expandFolder%3D0%26_20_folderStart%3D0%26_20_action%3DbrowseFolder%26_20_struts_action%3D%252Fdocument_library%252Fview%26_20_folderEnd%3D50%26_20_entryStart%803D0%26_20_folderId%3D3580498&_20_fileEntryId=3589880)

[1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview_file_entry&_20_redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpublicacoes-e-indicadores%2Fboletins-de-energia%3Fp_p_id%3D20%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-](http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview_file_entry&_20_redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpublicacoes-e-indicadores%2Fboletins-de-energia%3Fp_p_id%3D20%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_count%3D1%26_20_entryEnd%3D20%26_20_displayStyle%3Ddescriptive%26_20_viewEntries%3D1%26_20_viewFolders%3D1%26_20_expandFolder%3D0%26_20_folderStart%3D0%26_20_action%3DbrowseFolder%26_20_struts_action%3D%252Fdocument_library%252Fview%26_20_folderEnd%3D50%26_20_entryStart%803D0%26_20_folderId%3D3580498&_20_fileEntryId=3589880)

[1%26p_p_col_count%3D1%26_20_entryEnd%3D20%26_20_displayStyle%3Ddescriptive%26_20_viewEntries%3D1%26_20_viewFolders%3D1%26_20_expandFolder%3D0%26_20_folderStart%3D0%26_20_action%3DbrowseFolder%26_20_struts_action%3D%252Fdocument_library%252Fview%26_20_folderEnd%3D50%26_20_entryStart%80](http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview_file_entry&_20_redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpublicacoes-e-indicadores%2Fboletins-de-energia%3Fp_p_id%3D20%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_count%3D1%26_20_entryEnd%3D20%26_20_displayStyle%3Ddescriptive%26_20_viewEntries%3D1%26_20_viewFolders%3D1%26_20_expandFolder%3D0%26_20_folderStart%3D0%26_20_action%3DbrowseFolder%26_20_struts_action%3D%252Fdocument_library%252Fview%26_20_folderEnd%3D50%26_20_entryStart%803D0%26_20_folderId%3D3580498&_20_fileEntryId=3589880)

[3D0%26_20_folderId%3D3580498&_20_fileEntryId=3589880](http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview_file_entry&_20_redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpublicacoes-e-indicadores%2Fboletins-de-energia%3Fp_p_id%3D20%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_count%3D1%26_20_entryEnd%3D20%26_20_displayStyle%3Ddescriptive%26_20_viewEntries%3D1%26_20_viewFolders%3D1%26_20_expandFolder%3D0%26_20_folderStart%3D0%26_20_action%3DbrowseFolder%26_20_struts_action%3D%252Fdocument_library%252Fview%26_20_folderEnd%3D50%26_20_entryStart%803D0%26_20_folderId%3D3580498&_20_fileEntryId=3589880)>. Acesso em 16/02/2022.

[4] SCLIAR, C., SILVA, R. C., PEREIRA, V. C., 2018, *Ocorrências de minerais de urânio e tório no Brasil*. Disponível em:

<<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/1999/PDF/CG17AE.PDF>>. Acesso em:

16/02/2022.

[5] DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. 2001 Site:

<<http://www.dnpm-pe.gov.br/Detalhes/Potassio.htm>>. Acesso em 11/03/2018.

[6] LOUREIRO, F., “Terras raras no brasil: reservas e características químico-mineralógicas de suas ocorrências e depósitos”. In: Fátima Angel, *O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras*, 1ª edição, Capítulo II, Rio de Janeiro, 2013.

Disponível

em:

<

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1854/4/Cap.%20II%20TERRAS.pdf>>.

Acesso em: 11/03/2018.

[7] MELANCA, A, PESSINA, V., DALLARA, g., 1993, “Assesment of the natural radioactivity in te Brazilian State of Rio Grande do Norte”, *Health Physics*, v. 65, pp. 298 – 302.

[8] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Publications. UNSCEAR 2000 report – Vol. I: Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York, 2000.

[9] MAIA, M.E.F. 2006. *Variação espaço-temporal da distribuição dos minerais pesados na Praia da Areia Preta, Guarapari-ES*. Univ. Fed. Do Espírito Santo, Vitória (ES). Monog. de Grad. em Oceanografia (inéd.), 60p.

[10] NASCIMENTO, D.R., Jr. 2004. *Dinâmica e Sedimentação da Praia da Areia Preta (Guarapari – ES)*. Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro, Seropédica (RJ). Trabalho de Graduação em Geologia (inéd.), 109 p.

[11] EISENBUD, M., GESELL T., 1997, *Environmental radioactivity: from natural, industrial and military sources*, 4^a edition, Academic Press, New York.

[12] LOPES, JOSÉ MARQUES; *Dose Efetiva Comprometida aos Radionuclídeos ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra e ²²⁸Th Contidos nos Alimentos da Dieta da População do Estado do Rio de Janeiro*. José Marques Lopes.- Rio de Janeiro: UFR/COPPE, 2018. XIV, 17 p.:il.; 29,7cm.

[13] VASCONCELOS, D. C; *Estudo da radioatividade natural em areias de praia do extremo sul da Bahia utilizando métodos de análises nucleares*. Tese de Ph. D. Programa de Pós-graduação em ciências e Técnicas Nucleares/UFMG, 2010.

[14] KAPLAN, I. *Física Nuclear*. Guanabara Dois, 2^a ed, 1978.

[15] GARCÊZ, RICARDO WASHINGTON DUTRA. *Determinação das Atividades Específicas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K em amostras de fertilizantes Minerais* / Ricardo Washington Dutra Garcêz.- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016. VIII, 59pp. 1.

[16] NORM – Naturally Occurring Radioactive Materials. *World Nuclear Association*. 2014. Acessado em: 15/01/2022. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/safety-end-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-NORM>

[17] JÚNIOR J. A.S. AMARAL, R. S. SILVA, C. M. MENEZES, R. S. C. BEZERRA. J. D. , 2009, “Estudo comparativo entre detectores HPGe e NaI (Tl) na determinação de U-238, TH-232 e K-40 em amostras de solo” , *Scientia Plena*, v. 5, n. 4, pp. 1-16.

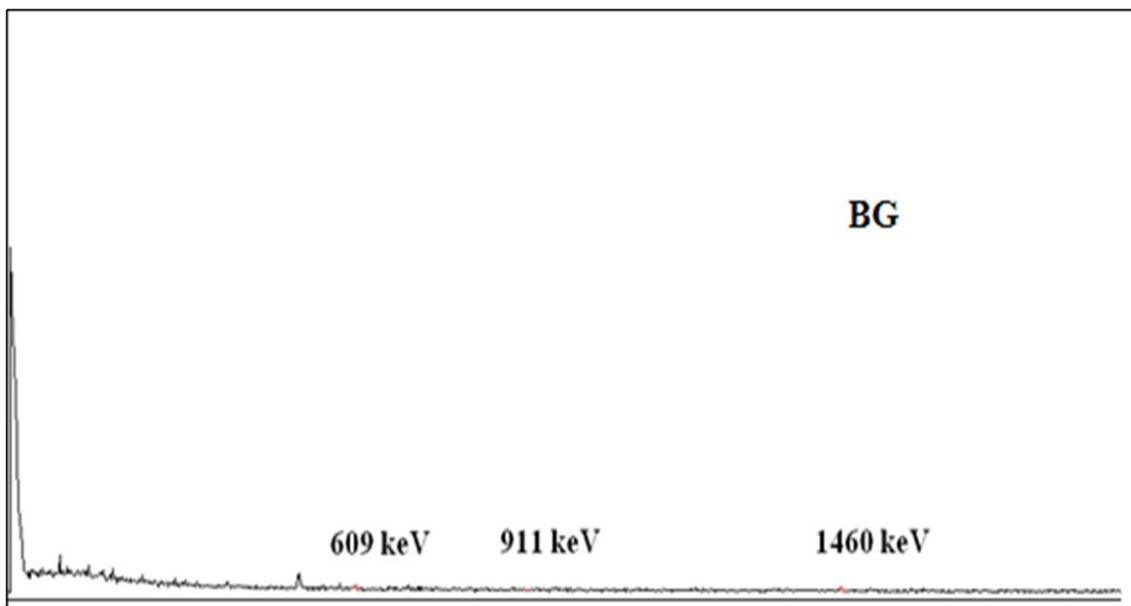
[18] SAITO, K., JACOB, P., 1995, “gamma-ray fields in the air due to sources in the ground”, *Radiation Protection and Dosimetry*, v. 58, n. 1 (Jan), pp. 29-45.

APÊNDICE A

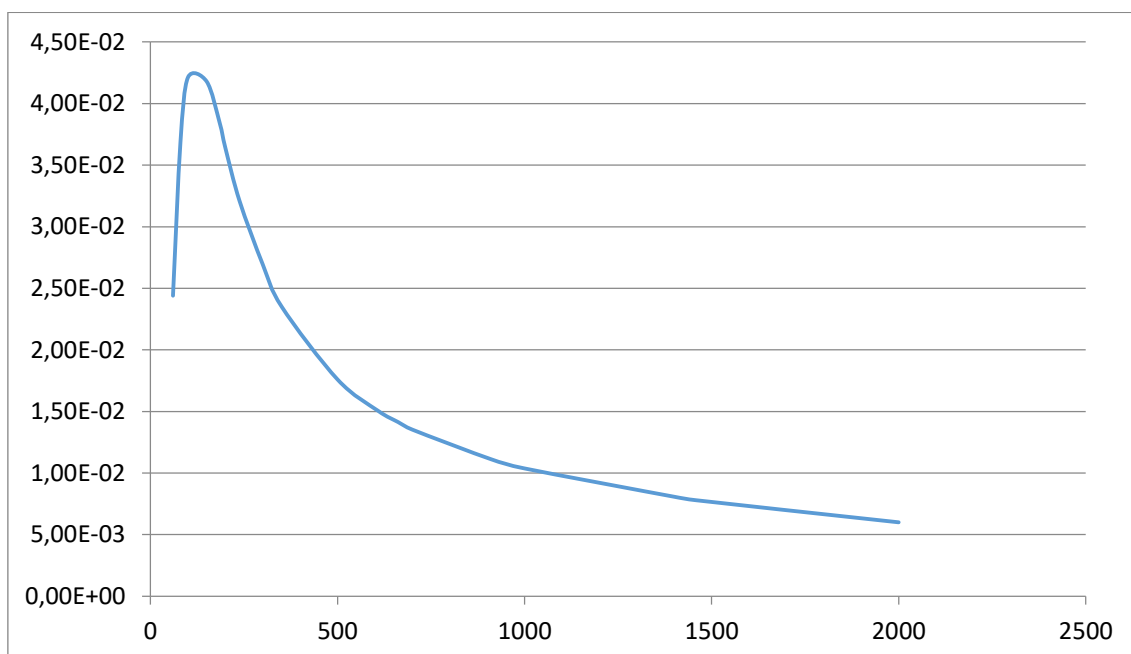
Instituto de Engenharia Nuclear

Laboratório LAASC-COPPE-UFRJ
Simulador LabSOCS

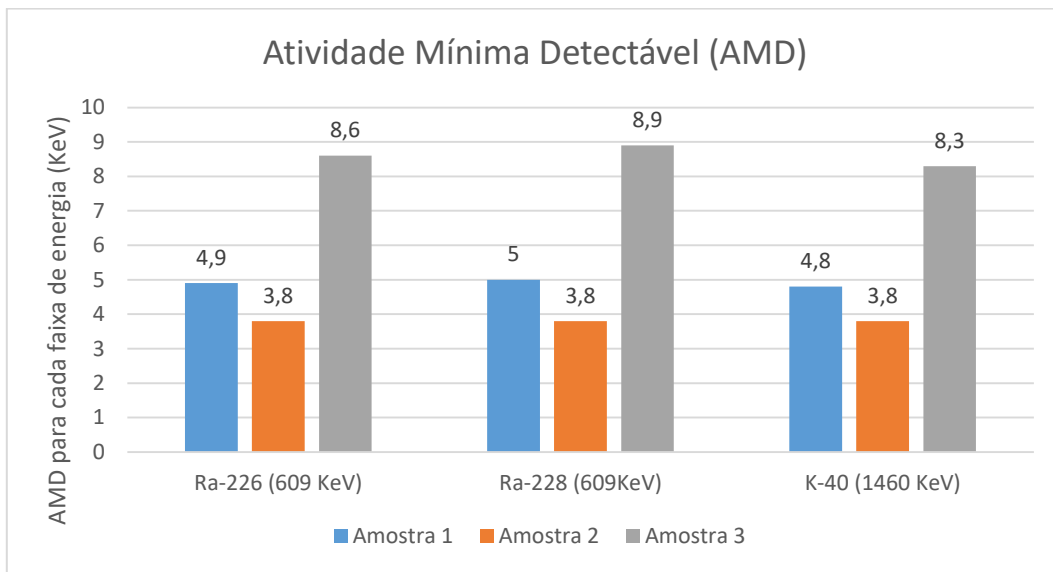
Espectro da radiação de fundo (BG), obtido com o detector HPGe.



Curva de eficiência obtida com o pacote de programa Genie 2k.



Atividade mínima detectável obtida por simulação computacional.



Concentração de atividade calculada com as contagens das amostras no HPGe.

