



ANÁLISE DA RADIOTIVIDADE NATURAL E DA TAXA DE MIGRAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS SOLO-PLANTA DE ALIMENTOS CULTIVADOS EM RESERVA AMBIENTAL

Nadia Rodrigues dos Santos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Inayá Corrêa Barbosa Lima
Edmilson Monteiro de Souza

Rio de Janeiro
Outubro de 2025

ANÁLISE DA RADIOTIVIDADE NATURAL E DA TAXA DE MIGRAÇÃO DE
RADIONUCLÍDEOS SOLO-PLANTA DE ALIMENTOS CULTIVADOS EM
RESERVA AMBIENTAL

Nadia Rodrigues dos Santos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientadores: Inayá Corrêa Barbosa Lima
Edmilson Monteiro de Souza

Aprovada por: Prof^a. Inayá Corrêa Barbosa Lima
Prof. Edmilson Monteiro de Souza
Prof. Ademir Xavier da Silva
Prof. Alexander Machado Cardoso
Prof. Jose Marques Lopes
Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2025

Santos, Nadia Rodrigues dos

Análise da Radiotividade Natural e da Taxa de Migração de Radionuclídeos Solo-Planta de Alimentos Cultivados em Reserva Ambiental/Nadia Rodrigues dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025.

XVI, 121 p. 29,7cm.

Orientadores: Inayá Corrêa Barbosa Lima

Edmilson Monteiro de Souza

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2025.

Referências Bibliográficas: p.101 –120.

1. Radioatividade Natural. 2. Espectometria Gama. 3. Fator de Transferência Solo-Planta. 4. Agricultura Orgânica. I. Lima, Inayá Corrêa Barbosa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Certamente que a bondade e a misericórdia me seguirão todos os dias da minha vida;
e habitarei na casa do Senhor por longos dias.*

Salmos 23:6

Dedicatória

*Aos meus pais, Zélia e Abelardo (in memoriam),
que com amor me ensinaram a perseverar.*

*Ao meu esposo, Hung Hin,
que é uma luz na minha vida.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo fôlego de vida, por ter me dado forças para caminhar até aqui, por ter me ajudado e me sustentado em todos os momentos de dificuldade.

À minha mãe, Zélia, pelas palavras de incentivo.

Ao meu esposo, Hung, pelo companheirismo, pelo incentivo, por toda ajuda e pelo apoio incondicional. À minha irmã, Zélia, e ao meu cunhado, Marcos, pelas orações e por todo apoio.

À minha orientadora, Inayá Corrêa Barbosa Lima, por todo o ensinamento, pela confiança depositada em mim, pelo incentivo constante à participação em eventos e pelo estímulo à produção acadêmica. Agradeço, de coração, por ser essa pessoa que passei a admirar ao longo desses anos.

Ao meu orientador, Edmilson Monteiro de Souza, pelos ensinamentos, pelas inúmeras mensagens com orientações, sugestões e exortações, pela paciência com as minhas dúvidas. Minha gratidão pelas palavras de apoio em todas as vezes que apresentei desânimo, pela amizade e pela fé compartilhada.

Ao Professor Ademir Xavier da Silva, por ter me recebido no programa e me apresentado ao LAASC, pela paciência com todas as minhas solicitações com as questões do laboratório.

Ao professor Delson Braz (*in memoriam*), por ter me acolhido como orientanda.

À UERJ/ZO e ao Laboratório de Modelos Reduzidos pela acolhida e permissão para realizar o preparo das amostras.

Ao Instituto Estadual do Ambiente por autorizar a pesquisa dos recursos naturais e permitir o acesso ao parque.

Aos membros da banca pela disponibilidade para participar desta etapa tão importante deste trabalho.

Ao amigo, Alessandro Domingues, um agradecimento especial por toda atenção, pela contribuição neste trabalho e principalmente pela amizade.

À amiga Izabella Souza, pelas sugestões, pela parceria e pelas palavras de ânimo.

Ao Rogério Filgueiras por toda ajuda prestada.

Aos amigos do LAASC, Thaís, Harley, Laisa, João, Paula, Pastrana, Marzullo e a todos os outros, pelas contribuições neste trabalho e pelos momentos de leveza

e alegria.

Ao Professor Julio Cezar Suita, pela atenção e pela generosidade de me receber e esclarecer minhas dúvidas. Às funcionárias e aos funcionários do PEN.

À Elaine Tinoco e ao Luiz Lima pelas orientações, pela escuta, pelas reflexões e por me ajudarem a questionar e a ressignificar meus pensamentos distorcidos sobre a vida.

Aos agricultores da Agropрата, em especial ao Sr. Alberto, por toda generosidade e disponibilidade.

Ao IFRJ pelo apoio institucional.

E, por fim, à todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DA RADIOTIVIDADE NATURAL E DA TAXA DE MIGRAÇÃO DE
RADIONUCLÍDEOS SOLO-PLANTA DE ALIMENTOS CULTIVADOS EM
RESERVA AMBIENTAL

Nadia Rodrigues dos Santos

Outubro/2025

Orientadores: Inayá Corrêa Barbosa Lima
Edmilson Monteiro de Souza

Programa: Engenharia Nuclear

O Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB), situado no município do Rio de Janeiro, é uma Unidade de Conservação (UC) destino de turismo ecológico. O local abriga agricultores familiares, que cultivam vegetais orgânicos. O presente estudo teve como objetivo analisar os radionuclídeos naturais ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em amostras de vegetais e solos provenientes do PEPB e estimar o fator de transferência destes radionuclídeos do solo para os vegetais. A técnica utilizada foi a análise por espectrometria gama com uso de um detector HPGe. No geral, as concentrações de atividade estão maiores do que a média mundial (UNSCEAR) e em concordância com a literatura específica. As doses efetivas anuais devidas à ingestão dos radionuclídeos foram estimadas e os resultados obtidos são inferiores à referência, $290 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$, indicada pela UNSCEAR, e inferiores ao limite, $1 \text{ mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$, estabelecido pela ICRP para o público em geral. Os valores de FT solo-planta estimados foram: $(0,16 \pm 0,03 - 2,36 \pm 0,46)$ para o ^{40}K , $(0,03 \pm 0,02 - 0,40 \pm 0,13)$ para o ^{226}Ra , $(0,04 \pm 0,02 - 0,33 \pm 0,20)$ para o ^{228}Ra , $(0,0047 \pm 0,0035 - 0,07 \pm 0,05)$ para o ^{228}Th . Esses resultados de FT solo-planta encontram pontos de concordância com a literatura.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF NATURAL RADIOACTIVITY AND THE RATE OF
RADIONUCLIDE MIGRATION FROM SOIL TO PLANTS GROWN IN AN
ENVIRONMENTAL RESERVE

Nadia Rodrigues dos Santos

October/2025

Advisors: Inayá Corrêa Barbosa Lima

Edmilson Monteiro de Souza

Department: Nuclear Engineering

Pedra Branca State Park (PEPB) is in the municipality of Rio de Janeiro and serves as both a Conservation Unit (UC) and a popular destination for ecotourism and adventure sports. The site is home to family farmers who grow organic vegetables. This study aimed to analyse the levels of the natural radionuclides ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , and ^{228}Th in soil and vegetable samples from PEPB, and to estimate the transfer factor of these radionuclides from soil to vegetables. Gamma spectrometry analysis with an HPGe detector was used for this purpose. Overall, activity concentrations are higher than the global average (UNSCEAR) and consistent with the specific literature. The annual effective doses from radionuclides ingestion were estimated, and the results obtained are below the reference value of $290\ \mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$ indicated by UNSCEAR and below the limit of $1\ \text{mSv}\cdot\text{year}^{-1}$ established by the ICRP for the general public. The estimated soil-plant FT values were: $(0.16 \pm 0.03 - 2.36 \pm 0.46)$ for ^{40}K , $(0.03 \pm 0.02 - 0.40 \pm 0.13)$ for ^{226}Ra , $(0.04 \pm 0.02 - 0.33 \pm 0.20)$ for ^{228}Ra , $(0.0047 \pm 0.0035 - 0.07 \pm 0.05)$ for ^{228}Th . These soil-plant FT results are consistent with the literature.

Sumário

Epígrafe	iv
Dedicatória	v
Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Siglas	xvi
Introdução	1
1.1 Contextualização e justificativa	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Contribuição da pesquisa	4
2 Revisão de Literatura	5
2.1 Parque Estadual da Pedra Branca	5
2.2 Ecoturismo	7
2.3 Alimentos orgânicos	8
2.3.1 Fertilizantes e agrotóxicos	11
2.4 Espectrometria gama em alimentos e FT	13
3 Fundamentação Teórica	17
3.1 Radiações ionizantes	17
3.2 Interação da radiação com a matéria	19
3.3 Decaimento radioativo	21
3.4 Séries radioativas	24
3.5 Radionuclídeos naturais	24
3.5.1 Potássio	27
3.5.2 Rádio	30
3.5.3 Tório	31
3.6 Equilíbrio secular	32

3.7	Radionuclídeos em alimentos	33
3.8	Fator de transferência solo-planta	34
3.9	Efeitos biológicos da radiação	36
3.10	Detecção de radiação ionizante	37
3.11	Sistema de espectrometria	40
3.11.1	Blindagem	41
3.11.2	Criostato	41
3.11.3	Calibração em energia	42
3.11.4	Programa Genie 2000	42
3.11.5	Composição de geometrias	42
3.11.6	Limite Mínimo de Detecção (LMD)	42
4	Materiais e Métodos	44
4.1	Autorização do INEA	44
4.2	Contato com a Agropirata	44
4.3	Obtenção das amostras	45
4.4	Preparo das amostras	46
4.4.1	Amostras de vegetais– Etapa 1	47
4.4.2	Amostras de vegetais - Etapa 2	50
4.4.3	Amostras de vegetal e solo – Etapa 3	53
4.5	Espectrometria gama	57
4.6	Detector HPGe	58
4.7	Calibração em energia	59
4.8	Curvas de eficiência	60
4.9	Validação do sistema de detecção	63
4.10	Concentração de atividade	65
4.11	Incerteza da atividade	65
4.12	Atividade mínima detectável	66
4.13	Dose efetiva comprometida	66
4.14	Estimativa do fator de transferência	68
5	Resultados e Discussão	69
5.1	Amostras de vegetais – etapa 1	69
5.2	Amostras de vegetais – etapa 2	75
5.3	Amostras de vegetais e solo – Etapa 3	80
6	Conclusão	98
6.1	Considerações finais e Propostas de trabalhos futuros	99
	Referências Bibliográficas	101

Lista de Figuras

2.1	Parque Estadual da Pedra Branca na cidade do Rio de Janeiro.	6
3.1	Esquema ilustrativo do efeito Compton.	20
3.2	Probabilidade de ocorrência dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares.	21
3.3	Esquema ilustrativo do efeito Compton.	23
3.4	Decaimento das séries do ^{238}U e do ^{232}Th	24
3.5	Radionuclídeos naturais desde o nascimento da Terra.	25
3.6	Níveis de exposição à radiação ionizante.	27
3.7	Ciclo do K no solo.	29
3.8	Esquema de decaimento do ^{40}K	30
3.9	Rotas dos radionuclídeos naturais no meio ambiente e exposição externa e interna	33
3.10	Composição aproximada do solo	35
3.11	Efeitos biológicos da radiação ionizante no corpo humano	36
3.12	Estrutura de bandas para as energias dos elétrons nos isolantes e semicondutores	39
3.13	Esquema de um sistema típico de espectrometria gama.	40
4.1	(a)Feira de orgânicos de Campo Grande; (b)Feira de orgânicos do Recreio.	46
4.2	(a) Liquidificador. (b) Espremedor de frutas.	47
4.3	Balança de precisão Gehaka modelo BG 4000.	48
4.4	Amostras de alimentos prontos para armazenamento.	49
4.5	Alimento em etapa de homogeneização.	51
4.6	Alimentos secos prontos para análise.	52
4.7	Trechos da trilha de acesso à área de estudo, PEPB.	54
4.8	Imagem gerada por satélite: identificação de dois terrenos do sítio. . .	55
4.9	Imagem gerada por satélite: identificação do início da trilha e um dos terrenos	55
4.10	Plantação de alface (a); Mamoeiro (b).	56
4.11	Alimentos secos prontos para análise.	57

4.12	Sistema de aquisição de dados: (a) blindagem do detector; (b) dewar; (c) multicanal DAS 1000; (d) microcomputador.	59
4.13	Curva típica gerada pelo LabSOCS.	61
4.14	Caixa de diálogo do software Laboratory SOurceless Calibration Software (LabSOCS).	61
4.15	Tela de simulação de geometria no LabSOCS.	62
4.16	Geometria modelada.	62
5.1	(a)Feira de orgânicos de Campo Grande; (b)Feira de orgânicos do Recreio.	75
5.2	Concentração de Atividade (CA) do ^{40}K nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.	81
5.3	Concentração de Atividade (CA) do ^{226}Ra nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.	84
5.4	Concentração de Atividade (CA) do ^{228}Ra nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.	86
5.5	Concentração de Atividade (CA) do ^{228}Th nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.	88
5.6	Correlação entre as concentrações de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th	90
5.7	Concentração de atividade do ^{40}K nos vegetais em 2023 e 2024.	92
5.8	Cenoura coletada em 2024.	93
5.9	Dose efetiva devido à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th	94
1	Questionário aplicado aos agricultores	121

Lista de Tabelas

3.1	Doses anuais devido a fontes naturais de radiação	25
4.1	Dados para o cálculo da atividade do ^{137}Cs com eficiência simulada.	64
4.2	Atividades medidas e calculadas para o ^{137}Cs	64
4.3	Isótopos de transição e probabilidade de emissão	65
4.4	Coeficientes de dose para diferentes radionuclídeos segundo a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) 119.	68
4.5	Dose efetiva comprometida (UNSCEAR [1]).	68

5.1	Concentração de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nas amostras <i>in natura</i>	69
5.2	Comparação das concentrações de atividade do ^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	72
5.3	Dose efetiva anual estimada para os radionuclídeos nas amostras <i>in natura</i> ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)	73
5.4	Concentração de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nas amostras <i>in natura</i>	76
5.5	Concentração de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) — dados da literatura.	77
5.6	Dose efetiva anual devido à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th . . .	79
5.7	Concentração de atividade (CA) do ^{40}K nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.	80
5.8	Concentração de atividade (CA) do ^{226}Ra nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.	83
5.9	Concentração de atividade (CA) do ^{228}Ra nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.	84
5.10	Concentração de atividade (CA) do ^{228}Th nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.	87
5.11	Concentração de radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nos vegetais nos anos de 2023 e 2024.	91

Lista de Quadros

2.1	Elementos e propósitos dos Sistemas Orgânicos de Produção.	10
2.2	Formatos de certificação ou controle.	11
3.1	Características dos tipos mais comuns de radiação.	18
3.2	Disponibilidade do potássio de acordo com o tipo de solo.	28
5.1	Registros pluviométricos do município do Rio de Janeiro em 2023 e 2024.	92
5.2	Resumo dos valores de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais nos vegetais analisados.	96

Lista de Siglas

PEPB Parque Estadual da Pedra Branca	1
INEA Instituto Estadual do Ambiente	2
ICRP Comissão Internacional de Proteção Radiológica	xiii
Agroprata Associação dos Agricultores Orgânicos da Pedra Branca	3
MAPA Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento	9
UNSCEAR Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica	14
IAEA INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY	26
LabSOCS Laboratory Sourceless Calibration Software	xiii
UERJ-ZO Universidade do Estado do Rio de Janeiro-Campus Zona Oeste	51
IUR International Union of Radioecology	53
LMR Laboratório de Modelos Reduzidos	56
HPGe Detector Germânio Hiperpuro	14
IRD Instituto de Radioproteção e Dosimetria	63
LAASC Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional	63
LGI Laboratório de Espectrometria Gama	64
AMD Atividade Mínima Detectável	66
NORM Materiais Radioativos de Ocorrência Natural	25
UC Unidade de Conservação	1
LMD Limite Mínimo de Detecção	42
BIPM Bureau International des Poids et Mesures	64
FT Fator de Transferência	68
CA Concentração de Atividade	69
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	67

Introdução

1.1 Contextualização e justificativa

O consumo de alimentos orgânicos e agroecológicos e o turismo ecológico e de aventura formam a base do contexto e da justificativa da presente pesquisa.

Situado na Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro, no maciço que leva o mesmo nome, o Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB), Unidade de Conservação (UC) de Proteção Integral, criado pela Lei Estadual nº 2.377/1974 (RIO DE JANEIRO, 1974), é considerado a maior reserva florestal em área urbana no mundo com aproximadamente 10% da área total do município do Rio de Janeiro, com cerca de 12500 hectares de área coberta por vegetação típica da Mata Atlântica. Embora o título deste estudo traga o termo informal “reserva ambiental”, o PEPB classifica-se como UC. O Parque é local de turismo ecológico e turismo de aventura, com diversas trilhas, várias opções de lazer e atrativos naturais, sendo bastante frequentado por cariocas e por turistas de outras localidades. O ponto culminante da cidade é o Pico da Pedra Branca, que se encontra dentro do Parque e pode ser acessado por trilhas. Em algumas dessas trilhas, há uma população formada por agricultores familiares, que, a fim de agregar valor à produção, adotaram o termo orgânico e através de parcerias com seus pares e instituições públicas e privadas, foram certificados como produtores orgânicos, obtendo o direito de participar de feiras orgânicas (CÂMARA [2]; SANTOS [3]; DIAS [4]).

A comercialização de frutas, hortaliças e vegetais cultivados em um sistema de agricultura familiar, em sítios no Parque Estadual da Pedra Branca PEPB, que por sua vez é destino de turistas apreciadores de atividades que estejam em sintonia com práticas sustentáveis, se revelou como uma oportunidade de investigação sobre os produtos e características de seus locais de origem. Como em um dos acessos às trilhas do parque, regularmente há uma feira de orgânicos e visitantes têm a possibilidade de adquirir e consumir estes alimentos na sua trajetória turística, surge o questionamento a respeito da segurança do consumo desses itens em termos de dose devido à radiação ionizante, pela presença de radionuclídeos naturais no solo das áreas de cultivo e consequentemente nos alimentos ali produzidos.

Os brasileiros estão mais preocupados com a alimentação na busca de manter

um estilo de vida saudável, evitando problemas decorrentes do consumo de alimentos inadequados. Atréadas a esta postura, pesquisas apontam um crescimento do consumo de produtos orgânicos, além da aquisição de uma vida mais saudável, há uma preocupação com a procedência dos alimentos e com cuidados ao meio ambiente. A ausência de defensivos agrícolas é um fator importante para esta escolha (PAULA [5]).

Estudos apontam que a agricultura orgânica é considerada sustentável e contribui para a garantia da segurança alimentar e proteção do ecossistema (CIDON ET AL. [6]). Em comparação com a agricultura convencional tem menor impacto nas ações climáticas devido ao baixo consumo de energia, principalmente por causa da não utilização de adubos sintéticos e da gestão do solo que ajuda a reduzir gases de efeito estufa (MOURÃO [7]).

Habitualmente, o cuidado com os alimentos se restringe à procedência, e à presença de aditivos químicos que sejam potenciais causadores de alguma enfermidade. Além disso, de acordo com Rocha [8], vêm tomando destaque os alimentos ultraprocessados, de forma que se desestimula o consumo desses produtos e se incentiva a escolha por alimentos in natura. Dito isto, um fato alheio ao conhecimento de muitos cidadãos é a presença de radionuclídeos naturais em todos os alimentos. Estes radionuclídeos são responsáveis pela dose de exposição interna de radiação. Estudos que apontem a dose devido a ingestão de radionuclídeos em alimentos são importantes para garantir a segurança no consumo no quesito limite de dose estabelecido pela *ICRP*.

O consumo de alimentos orgânicos devidamente certificados garante a ausência de fertilizantes com potencial fonte de incremento de dose por ingestão; por outro lado, não se deve desprezar a presença de radionuclídeos naturais cuja concentração depende de fatores como a região do cultivo.

Paralelo ao aumento do consumo de alimentos orgânicos, há um crescimento no setor do ecoturismo. O PEPB, localizado no município do Rio de Janeiro, é um local de turismo ecológico que possui diversas trilhas e várias opções de lazer e é uma das Unidades de Conservação Estadual que mais recebe visitantes, porém, como ainda não há monitoramento padronizado por parte do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), presume-se um número maior de visitantes do que a estimativa atual (OLIVEIRA, PENA, PEIXOTO [9]).

No ano de 2013, o INEA publicou o guia de caminhadas do PEPB com o objetivo de divulgar o espaço com potencial para atividades ao ar livre, que à época era pouco conhecido tanto pelos cariocas quanto por visitantes de outras localidades do Brasil e do mundo (INEA [10]). De acordo com (Santos, 2014), o guia, disponível gratuitamente no site do INEA, contribuiu para o aumento do número de frequentadores do parque.

Mundialmente são realizadas pesquisas que estimam as doses devido a radionuclídeos naturais presentes em alimentos, entretanto nem todos os estudos realizados na área apresentam a origem dos produtos analisados que muitas vezes são adquiridos no mercado varejista dificultando sua rastreabilidade e consequentemente o conhecimento do local do cultivo e a influência deste na absorção de determinados radionuclídeos, portanto, a proposta deste trabalho é determinar a concentração de atividade de radionuclídeos naturais presentes em alimentos orgânicos cultivados em sítios no Parque Estadual da Pedra Branca, com base no consumo alimentar publicado pelo IBGE [11] e no coeficiente de dose publicado pelo (ICRP 119 [12]).

Os resultados obtidos nesta pesquisa podem contribuir com informações a respeito da exposição dos moradores da região, dos visitantes, dos turistas e da população que consomem os alimentos orgânicos produzidos no parque, a obtenção de dados para compor a construção do background característico do Parque Estadual da Pedra Branca e uma garantia complementar da segurança do alimento orgânico produzido pelos agricultores da Associação dos Agricultores Orgânicos da Pedra Branca (Agroprata).

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a presença dos radionuclídeos naturais ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em amostras de vegetais e solos provenientes do Parque Estadual da Pedra Branca. Para tal propósito, as etapas desenvolvidas seguiram os seguintes objetivos específicos:

- Coletar e preparar amostras de vegetais e de solos.
- Determinar a concentração de atividade dos radionuclídeos naturais ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em amostras de vegetais cultivados em sítios no PEPB e adquiridas nas feiras de orgânicos da Agroprata.
- Determinar a concentração de atividade dos radionuclídeos naturais ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em amostras de vegetais e de solos de cultivo em um sítio localizado no PEPB.
- Estimar a dose efetiva comprometida com base no consumo alimentar publicado pelo IBGE [11] e no coeficiente de dose da publicação 119 da ICRP [12].
- Estimar o fator de transferência solo-planta para ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em cultivo orgânico do PEPB.

1.3 Contribuição da pesquisa

Os resultados da pesquisa contribuem para a ampliação do conhecimento sobre os alimentos cultivados no PEPB a partir de uma perspectiva não usual, isto é, não se trata de uma análise sobre o teor de determinadas vitaminas, proteínas ou microorganismos nocivos, e sim com uma abordagem voltada para a radioecologia associada ao turismo ecológico, algo novo para os estudos já realizados na região. Um ponto relevante do estudo desenvolvido foi a análise de amostras de alimentos com rastreabilidade¹, que num primeiro momento foram adquiridas diretamente dos produtores e posteriormente coletadas no próprio local de plantio, enfatizando que a rastreabilidade é um mecanismo que confere a segurança dos alimentos. Acrescenta-se ainda uma observação acerca de um dos critérios que classificam os produtos como orgânicos, que é a não utilização de fertilizantes químicos ou sintéticos, isso porque alguns estudos apontam que a aplicação de fertilizantes, como os fosfatados, pode contribuir para o aumento da dose de radiações ionizantes. É importante ressaltar que os produtos comercializados pela Feira Orgânica do Rio da Prata são certificados de acordo com o Sistema Participativo de Garantia (SPG) e isso implica em fiscalizações da modalidade Órgãos de Controle Social (OCS), de forma que os resultados desta pesquisa podem constituir dados, a partir da análise de fenômenos físicos, que reafirmem a não aplicação de fertilizantes sintéticos. O trabalho também se identifica, ainda que indiretamente, com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) números 2, 12 e 13, 14 e 15 que tratam de sistemas sustentáveis de produção de alimentos, uso sustentável dos ecossistemas terrestres, monitoramento dos impactos no turismo sustentável e planejamento relacionado às mudanças climáticas (IDIS [13]; ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU [14]). Os resultados obtidos a partir desta pesquisa contribuirão para esses objetivos ao avaliar prováveis riscos à saúde associados à ingestão de alimentos orgânicos cultivados em uma área específica, PEPB, fornecendo informações relevantes para a proteção da saúde das pessoas e a promoção de práticas alimentares seguras e sustentáveis.

¹De acordo com FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2017) o conceito de rastreabilidade inclui a capacidade de identificar e acompanhar o alimento em etapas diferentes da cadeia produtiva.

2

Revisão de Literatura

2.1 Parque Estadual da Pedra Branca

O Parque Estadual da Pedra Branca, UC de Proteção Integral, criado pela Lei Estadual nº 2.377/1974 (RIO DE JANEIRO, 1974), é considerado a maior reserva florestal em área urbana no mundo com aproximadamente 10% da área total do município do Rio de Janeiro, com cerca de 12500 hectares de área coberta por vegetação típica da Mata Atlântica. O Parque é local de turismo ecológico, com diversas trilhas, várias opções de lazer e atrativos naturais, sendo bastante frequentado por cariocas e por turistas de outras localidades. O ponto culminante da cidade é o Pico da Pedra Branca, que se encontra dentro do Parque e pode ser acessado por trilhas. Em algumas dessas trilhas, há uma população formada por agricultores familiares, que, a fim de agregar valor à produção, adotaram o termo orgânico e através de parcerias com seus pares e instituições públicas e privadas, foram certificados como produtores orgânicos, obtendo o direito de participar de feiras orgânicas (CÂMARA [2]; SANTOS [3]; DIAS [4]).

Na Zona Oeste carioca, no Maciço da Pedra Branca, agricultores e agricultoras obtiveram, como resultado da busca de reconhecimento da prática agrícola realizados em espaços da cidade e sua inserção em políticas públicas para a agricultura familiar, o fortalecimento de organizações como a Agroprata, que participa do circuito de feiras orgânicas permitindo levar a outros espaços da cidade, produtos da agricultura da Pedra Branca.

No interior do Parque, há cerca de cinco mil moradores, entre os quais se destacam três comunidades quilombolas e os agricultores familiares, que integram o grupo da população nativa, ou seja, pessoas que nasceram no maciço (DIAS [15]). O PEPB é um espaço de conservação da natureza e os agricultores do Maciço da Pedra Branca procuram mostrar como suas práticas agrícolas podem se conciliar com os objetivos desta conservação (PRADO ET AL. [16]).



Figura 2.1: Parque Estadual da Pedra Branca na cidade do Rio de Janeiro.

Fonte: Modificada de INEA [19].

Situado na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, o PEPB, Figura 2.1, administrado pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente INEA, está inserido na Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, assim declarada pela UNESCO em 1992 e abrange todas as áreas situadas acima da linha da cota de 100m do Maciço da Pedra Branca e seus contrafortes, em partes de 17 bairros: Jacarepaguá, Taquara, Camorim, Vargem Pequena, Vargem Grande, Recreio dos Bandeirantes, Grumari, Padre Miguel, Bangu, Senador Camará, Jardim Sulacap, Realengo, Santíssimo, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Guaratiba e Barra de Guaratiba, Figura 2.1. (SARDINHA [17]; SANTOS [3]; BALIEIRO ET AL. [18]; INEA [10], p.27).

O Maciço da Pedra Branca serviu para exploração de carvão vegetal do século XVIII ao início do XX, vestígios de carvoarias artesanais podem ser encontrados no interior da floresta, tanto em locais de baixa altitude e de fácil acesso como em áreas isoladas em zonas mais altas (AS-PTA [20]; SANTOS ET AL. [21]). A atividade carvoeira promove impactos no meio ambiente como poluição do ar, aumento da erosão, emissão de material particulado e alteração na qualidade do solo (GARCIA; LIMA [22]).

Rodrigues *et al.* [23], analisaram amostras de solo de um forno de carvão abandonado no maciço da Pedra Branca. As amostras foram retiradas do centro da área afetada pelo forno, da área de deposição de resíduos de carvão não utilizados para

comercialização e do arredor numa área acima não afetada pelo forno. Esta amostra foi a referência. Os autores fizeram análises elementares e a caracterização da fertilidade do solo.

Foram encontrados e mapeados 1176 fornos de carvão vegetal no Maciço da Pedra Branca. Em praticamente todas as encostas do maciço são encontrados platôs das antigas carvoarias formando solos antropogênicos com fragmentos de carvão (SOLÓNZANO; BRASIL-MACHADO; OLIVEIRA [24]). Essas atividades carvoeiras foram responsáveis por grandes modificações da estrutura e composição da floresta (NORONHA; FREITAS; SOLÓNZANO [25]).

Estudos sobre radiação natural no PEPB são escassos, foram encontrados dois trabalhos com dados de análise de radionuclídeos naturais em rochas do Núcleo Piraquara (Do Ouro Neto *et al.* [26]; Souza *et al.* [27]) e apenas um de mesma autoria do presente estudo com determinação de curvas de eficiência visando a análise de frutas orgânicas provenientes desta região (DOS SANTOS [28]).

2.2 Ecoturismo

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, o conceito de “turismo ecológico” é: “Ecoturismo é um segmento da atividade turística que utiliza, de forma sustentável, o patrimônio natural e cultural, incentiva sua conservação e busca a formação de uma consciência ambientalista por meio da interpretação do ambiente, promovendo o bem-estar das populações.”

O uso público de áreas protegidas, que consiste em visitação com diversas finalidades, interpretação e conscientização ambiental, que usufrui dos atrativos dos parques estaduais e sua infraestrutura, requer a ação de gestores públicos ou privados sobre o controle territorial, tendo como referência a elaboração de Planos de Manejo com informações específicas sobre a área. As UCs estão sujeitas às normas e restrições estabelecidas no Decreto Estadual 42.483/2010, que dispõe sobre o uso público nos parques estaduais administrados pelo INEA, como é o caso do PEPB (GUEDES [29]; BRASIL [30]).

O ecoturismo surge após a crescente ocorrência de catástrofes ambientais provocadas principalmente pelas alterações climáticas observadas recentemente. Esta modalidade surge como uma alternativa ao turismo convencional, de massa, associado ao grande impacto às áreas que utiliza (LIMA, DO AMARAL & LIMA [31]).

No Brasil, o ecoturismo destaca-se a partir do movimento ambientalista em meio às discussões sobre a necessidade de conservação do meio ambiente a partir de técnicas sustentáveis, alcançando o setor turístico. Entre os princípios deste modelo de turismo mais responsável está a conservação ambiental, aliada ao envolvimento com comunidades locais de forma que seu desenvolvimento esteja de acordo com os

princípios da sustentabilidade, Ministério do Turismo (BRASIL [30]).

O município do Rio de Janeiro recebe grande número de turistas, em particular no segmento do ecoturismo (VILANI e COELHO [32]).

Setores diferenciados da sociedade podem dar significados diferentes para o termo “ecoturismo” de acordo com seus interesses. Segundo dos Santos [33], estes setores são: o trade turístico, que inclui agências de viagem, hotéis, guias; governos e organismos oficialmente ligados ao turismo; as organizações não governamentais da área ambiental interessadas e preocupadas com a conservação; o público turista e suas diferentes motivações de viagem; o meio acadêmico debruçado sobre a pesquisa e a reflexão do tema. e as populações residentes nos destinos potenciais. Este último setor tem relevância nesta pesquisa, uma vez que o PEPB é uma UC explorada turisticamente e, como o espaço é fonte de radionuclídeos naturais, cabe a análise e monitoração radiológica com foco na proteção dos visitantes no que diz respeito à segurança alimentar.

2.3 Alimentos orgânicos

Nas décadas de 60 e 70, a chamada Revolução Verde foi introduzida no Brasil com o mesmo objetivo mundial, o de aumentar a produção agrícola com a utilização de tecnologias. Desta forma, foi implementado o uso de agrotóxicos, fertilizantes, alimentos geneticamente modificados e mecanização na agricultura. (OCTAVIANO [34]).

Mesmo com os benefícios decorrentes da modernização, aspectos negativos também puderam ser apontados. Durante o século XX, o crescimento de impactos sociais e ambientais intensificou o questionamento do sistema de agricultura convencional, ambientalistas passaram a criticar o modelo tecnológico da Revolução Verde e os questionamentos possibilitaram a apresentação de novas formas de produção mais sustentáveis, e naquele mesmo século, surgiram modalidades alternativas de agricultura, como a orgânica, a natural a biodinâmica entre outras. (CANDIOTTO [35]; SOUZA [36]).

A agricultura orgânica foi proposta por Albert Howard em 1940. O pesquisador inglês, durante seu trabalho na Índia, observou que agricultores indianos não utilizavam fertilizantes químicos e nem agrotóxicos no cultivo e na criação de animais. Após cerca de 40 anos de pesquisa desenvolveu um método pautado na importância do solo para produção de alimentos (CANDIOTTO [35]; MATOS [37]).

Nas últimas duas décadas, as práticas agrícolas orgânicas evoluíram rapidamente em todo o mundo. De 2000 a 2017, a área agricultável mundial destinada a cultivos orgânicos aumentou 365%. O mercado global de alimentos orgânicos foi avaliado em US\$ 177,08 bilhões, em 2023, com previsão de chegar a US\$ 529,64 bilhões em 2032 (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS [38]; LIMA *et al.* [39]). O crescimento mundial

do consumo de orgânicos se dá sob a tendência de adquirir hábitos mais saudáveis atrelados às práticas e ao consumo sustentáveis (SADIQ, ADIL, PAUL [40]).

A preocupação em produzir e consumir orgânicos no Brasil começou no final da década de 1970 e início da década de 1980, entretanto, somente em 1990 movimentos sociais a favor de alimentos livres de agrotóxicos e práticas de agricultura orgânica ganharam força (VALENÇA [41]).

De acordo com o Ministério da Saúde [42], a principal característica para um alimento ser definido como orgânico é a não utilização de agrotóxicos, adubos químicos ou substâncias sintéticas que agriçam o meio ambiente. Pela legislação brasileira, um produto, *in natura* ou processado, é considerado orgânico quando obtido por um sistema orgânico de produção agropecuária ou oriundo de um processo extrativista sustentável e não prejudicial ao ecossistema local (BRASIL [43]).

O Quadro 2.1 apresenta um resumo, com os propósitos de cada elemento dos Sistemas Orgânicos de Produção indicados pelo MAPA [44]).

No Brasil, o mercado de produtos orgânicos se desenvolveu a partir da comercialização em circuitos curtos, principalmente em feiras locais, onde o consumidor tem a garantia do produto transmitida pelo produtor (MEDAETS ET AL. [45]). Entretanto, a Instrução Normativa nº 007 de 17 de maio de 1999, por meio do Ministério da Agricultura e do Abastecimento Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), estabeleceu normas de produção, tipificação, processamento, envase, distribuição, identificação e certificação de qualidade para os produtos orgânicos de origem vegetal e animal. Mais tarde, o regramento para produção e comercialização dos produtos orgânicos foi estabelecido pela lei nº 10831, publicada em 23 de dezembro de 2003, e sua regulamentação por meio do Decreto nº 6323/2007 e normas complementares foi construída de forma participativa, envolvendo toda a Rede de Produção Orgânica e diversos setores da sociedade.

A certificação dos produtos orgânicos por organismos credenciados ao Ministério da Agricultura é obrigatória, com exceção dos agricultores familiares que fazem parte de organizações de controle social cadastradas no MAPA, que realizam somente venda direta aos consumidores. São três os formatos de certificação ou controle, o Quadro 2.2 apresenta a descrição de cada um deles.

A pesquisa "Panorama do Consumo de Orgânicos no Brasil 2023", realizada pela Brain Inteligência Estratégica, revelou que aproximadamente 46% da população brasileira consome alimentos orgânicos e apontou que houve um aumento de 16% no consumo desse tipo de alimento entre 2021 e 2023. De acordo com a matéria da Food Connection, entre os motivos para o aumento do consumo de orgânicos no Brasil estão a busca por uma vida mais saudável, a conscientização ambiental e a percepção de que os alimentos orgânicos possuem sabor mais natural (FOOD CONNECTION [46]). O Rio de Janeiro acompanhou a tendência nacional de consumo

Elemento	Propósito
Produtos isentos de contaminantes	Evitar riscos para o meio ambiente e à saúde do produtor/trabalhador/consumidor.
Diversidade biológica	Preservar, recompor ou incrementar a diversidade biológica dos ecossistemas onde a produção está inserida.
Fertilidade do solo	Emprego de produtos ou processos que promovam o desenvolvimento e equilíbrio da atividade biológica do solo.
Unidades de produção	Uso saudável do solo, da água e do ar; redução de contaminação e desperdícios.
Estabelecimentos	Relações trabalhistas com base na justiça, dignidade e equidade.
Rede de produção	Incentivo à integração dos produtores, regionalização da produção-comércio; estímulo à relação direta produtor-consumidor final.
Resíduos de origem orgânica	Reciclagem dos resíduos a fim de reduzir o emprego de recursos naturais não renováveis.
Manuseio	Práticas que mantenham a integridade orgânica desde a produção até o consumidor.
Manejo produtivo	Preservação do bem estar dos animais.

Fonte: Adaptado de BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, [43].

Quadro 2.1: Elementos e propósitos dos Sistemas Orgânicos de Produção.

Formato	Descrição
Certificação por auditoria	Selo SisOrg concedido por certificadora pública ou privada credenciada no MAPA e organismo de avaliação que obedece a critérios internacionais reconhecidos e a requisitos da legislação brasileira.
Sistema Participativo de Garantia	Responsabilidade coletiva dos membros do sistema. Um Organismo Participativo da Avaliação da Conformidade (OPAC) emite o SisOrg.
Controle social na venda direta	Agricultores familiares dispensados da certificação necessitam do credenciamento numa organização de controle social cadastrada em órgão fiscalizador oficial.

Fonte: Adaptado de BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, [43].

Quadro 2.2: Formatos de certificação ou controle.

de alimentos do gênero entre 2013 e 2019 (CDNL [47]).

Em 2025, a produção nacional de alimentos orgânicos aumentou 12% em relação ao ano anterior, atingindo o maior índice já registrado. O crescimento ocorre com a ampliação das áreas certificadas e, segundo o MAPA, o número de propriedades orgânicas ultrapassou 30 mil no país (MIRANDA [48]).

Os alimentos orgânicos mais consumidos no Brasil são a banana, a batata e a alface (CDNL [47]).

Neste estudo, os vegetais analisados são produzidos por agricultores da Agroprata. Esta associação surgiu de um projeto da ONG Roda Viva, que orientou os agricultores sobre a prática da agricultura orgânica, de forma a terem seus produtos valorizados com a produção de derivados, como frutas desidratadas. Desde 2002, a Agroprata tem atuado para criar a identidade do agricultor orgânico vinculada à preservação do meio ambiente (DIAS [4]).

2.3.1 Fertilizantes e agrotóxicos

O desenvolvimento dos vegetais é influenciado pela disponibilidade de nutrientes presentes no solo em que são cultivados. Nos casos de deficiência desses nutrientes e da presença de pragas e doenças que prejudicam as culturas, a aplicação de fertilizantes e agrotóxicos torna-se necessária. Esses insumos têm a função de beneficiamento e proteção nos processos de produção agrícola. Nesta seção serão abordados o uso de agrotóxicos nas plantações e a relação entre a concentração de radionuclídeos

naturais e o uso de fertilizantes.

De acordo com Zonta *et al.* [49], fertilizantes ou adubos são compostos químicos empregados para suprir as necessidades das plantas e, quando adicionados ao solo nas quantidades corretas, devem promover melhorias e aumentar a produtividade e a qualidade da colheita. Mesmo com fertilidade natural adequada, os solos podem ter a capacidade de fornecer nutrientes após cultivos sucessivos, de forma que medidas de correção e manutenção com aplicação de adubos devem ser tomadas para manter a fertilidade do solo.

As plantas necessitam de certos nutrientes, elementos químicos presentes na natureza, para seu desenvolvimento e parte desses nutrientes é absorvida a partir do solo, que pode ter suas características facilmente modificadas através da aplicação de adubos ou fertilizantes (BRASIL [50]).

Níveis elevados no solo de radionuclídeos presentes em fertilizantes fosfatados, incluindo ^{226}Ra , podem resultar em níveis elevados em certas culturas e resultar em uma exposição elevada de radionuclídeos em seres humanos devido à ingestão dessas culturas (BRIGDEN, STRINGER, e SANTILLO [51]).

Ba, Thien e Loan [52] verificaram em seus estudos que a aplicação de fertilizante do tipo NPK no solo afeta a radioatividade do ambiente e que vegetais cultivados com uso de fertilizante NPK têm a absorção e o transporte de ^{226}Ra e ^{228}Th aumentados no ambiente.

Fertilizantes fosfatados possuem quantidades excessivas de radionuclídeos e sua utilização pode aumentar a exposição humana à radiação interna e externa. Radionuclídeos da série do urânio e do tório e ainda o potássio 40 estão presentes em rochas fosfáticas, que são a matéria prima dos produtos fosfatados, incluindo adubos utilizados na agricultura (HEGEDÜS [53]; QAMOUCHE ET AL. [54]).

Segundo Silveira [55], no processo de beneficiamento do fosforito, o urânio se concentra no ácido fosfórico, matéria-prima dos fertilizantes fosfatados; desta forma, a utilização deste tipo de fertilizante pode aumentar os níveis de urânio no solo.

A maioria dos solos brasileiros agricultáveis apresenta deficiência natural em fósforo, tornando-os como principal fonte deste nutriente os fertilizantes fosfatados. A rocha fosfática constitui matéria-prima básica para a produção da maior parte dos fertilizantes no Brasil e do mundo (BENITES [56]; INÁCIO [57]).

A rocha fosfática constitui matéria-prima básica para a produção da maior parte dos fertilizantes no Brasil e no mundo, e em termos de consumo mundial, o Brasil ocupa o terceiro lugar como consumidor de fertilizantes fosfáticos (OLIVEIRA [58]; INÁCIO [59]).

Segundo Wasserman *et al.* [60], a aplicação intensiva de fertilizantes fosfatados em áreas agrícolas pode aumentar as concentrações de radionuclídeos naturais nos solos.

Além dos fertilizantes, os agrotóxicos, também conhecidos como defensivos agrícolas ou pesticidas, são utilizados na agricultura de modo a interferir em vários aspectos no desenvolvimento dos vegetais.

De acordo com a Lei Federal número 7.802 de 1989, agrotóxicos e afins são produtos e agentes físicos, químicos ou biológicos destinados à modificação da fauna e da flora com o objetivo de preservá-las da ação de seres vivos nocivos. Consideram-se ainda substâncias e produtos empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento.

Segundo Eshkaraev, Turaev e Eshkoraev [61], em investigação desde 2018, concluíram que os radionuclídeos no solo são mais nocivos em zonas com elevados níveis de pesticidas. Os mesmos autores, para estudar o efeito dos pesticidas no aumento da radioatividade do solo, adicionaram um pesticida às amostras de solo livres de aditivos e concluíram que elevado teor de pesticida promove a formação de uma película fina orgânica que resulta na cumulação de água, substâncias tóxicas e radionuclídeos na parte fértil do solo.

Embora estudos apontem para a relação entre a aplicação de radionuclídeos e o aumento da concentração de radionuclídeos naturais, há estudos que não corroboram esta associação. Ribeiro [62] avaliou a concentração de atividade de radionuclídeos naturais em vegetais produzidos em cultivo convencional, orgânico e hidropônico e concluiu que os vegetais analisados (alface, cenoura e feijão) apresentaram valores de concentração de ^{226}Ra e ^{228}Ra similares, indicando que a influência do tipo de manejo não é significativa. O mesmo autor verificou que os resultados obtidos para o cultivo da cenoura mostraram que, a depender das características do solo e do adubo, maiores concentrações de radionuclídeos poderiam ser encontradas em vegetais provenientes de manejo orgânico.

Os alimentos orgânicos devem ser isentos da aplicação de agrotóxicos (defensivos agrícolas) e fertilizantes sintéticos, de modo que a análise da concentração de radionuclídeos nos alimentos desta categoria é importante para revalidar ou pressupor a ausência dos insumos proibitivos.

2.4 Espectrometria gama em alimentos e FT

Identificar e quantificar os radionuclídeos presentes nos alimentos é uma etapa importante do monitoramento ambiental e de proteção radiológica. Conhecer a atividade dos radionuclídeos permite a realização de uma estimativa da dose a que um indivíduo do público está exposto e a contribuição da dose total devida à ingestão dos alimentos (CARDOSO [63]).

A identificação de radionuclídeos e suas respectivas concentrações de atividade, em amostras ambientais, é frequentemente obtida através da análise por espectro-

metria gama, método amplamente utilizado para este fim (ARINE [64]). Os fótons de raio gama possuem energia discreta característica de cada radioisótopo. A espectrometria gama mede a energia correspondente a cada fóton de raio gama proveniente da amostra analisada (IAEA [65]).

Nesta seção são apresentadas pesquisas realizadas em diversas partes do mundo com o objetivo de determinar a concentração de atividade de radionuclídeos naturais, a dose efetiva por ingestão e o fator de transferência solo-planta.

Kessaratikoon *et al.* [66] analisaram as atividades específicas de radionuclídeos naturais (^{40}K , ^{226}Ra e ^{228}Th) e antropogênicas (^{137}Cs) em solo de arrozal e grãos orgânicos de arroz Sangyod com o objetivo de determinar os fatores de transferência (valores TF) de todos os radionuclídeos necessários no subdistrito de Don Pradu, distrito de Pak Phayun, na província de Phatthalung, no sul da Tailândia. Os autores concluíram que o arroz Sangyod na área de estudo pode ser usado para cultivar um alimento básico bom e saudável para consumo da população local ou para exportação sem nenhum efeito de radiação subsequente.

Hassan *et al.* [67] analisaram a presença e concentrações de ^{40}K , ^{226}Ra e ^{228}Ra nos alimentos básicos: arroz, painço e trigo, da Nigéria. A medição de radioatividade nas amostras e análise foram feitas por espectrometria gama via Detector Germânio Hiperpuro (HPGe) e software Gamma Vision 5.0. Globalmente, os dados medidos foram encontrados abaixo dos valores médios prescritos pela Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR). A radioatividade de ^{226}Ra e ^{228}Ra no milheto foi mais alta do que a dos outros alimentos. O consumo de Millets deve ser < 181 g/d para evitar efeitos deletérios à saúde. A dose efetiva anual foi encontrada abaixo da referência do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica UNSCEAR, dose interna de $290 \mu\text{Sv/ano}$.

Ilori e Chetty [68] determinaram a concentração de atividade dos radionuclídeos naturais (^{40}K , ^{226}Ra e ^{228}Th) nos solos agricultáveis e nos alimentos culturalmente comuns para os indígenas (batata, milho e feijão fradinho), em áreas de produtoras e não produtoras de petróleo, na África do Sul. Para análise e detecção dos radionuclídeos foi utilizado um detector de germânio hiper puro HPGe. Os valores encontrados mostraram uma maior concentração de atividade nos solos agrícolas coletados nas áreas produtoras de petróleo em comparação com a área não petrolífera. O potássio apresentou valores mais altos em todas as amostras de solo e cultura.

Van *et al.* [69] estudaram as concentrações de atividade, os Fatores de Transferência Solo-Planta (FT) e riscos radiológicos do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Th e ^{137}Cs para dez pares de vegetais e solos selecionados em Tien Le, perto de Hanói, no Vietnã. As concentrações de atividade foram medidas com a utilização de um detector de germânio hiper puro (HPGe) e as análises foram feitas com o software Gama Vision.

Os resultados indicam que os índices de risco radiológico deriváveis, por exemplo, taxa de dose gama absorvida, dose equivalente anual efetiva, índices de radiação externa e interna, preveem um impacto insignificante na saúde humana.

Thien *et al.* [70] estimaram o FT e a dose equivalente anual no órgão devido à ingestão de radionuclídeos. O estudo foi feito a partir de 13 amostras de culturas alimentares populares na cidade de Ho Chi Minh, Vietnã. Foi utilizado um detector HPGe para obter a concentração de radionuclídeos. O software Rad Toolbox v 3.0.0 da U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, foi utilizado para estimar a dose anual equivalente no órgão, devido à ingestão de alimentos, e estimar os efeitos estocásticos para órgãos específicos. No geral, os valores de dose obtidos foram inferiores ao valor médio recomendado pela UNSCEAR para a ingestão de culturas alimentares investigadas. A concentração de radionuclídeos naturais encontrados nas amostras de solo e alimentos estava dentro dos valores seguros. Os FTs foram encontrados nesta ordem: $^{40}\text{K} > ^{210}\text{Pb} > ^{232}\text{Th} > ^{238}\text{U} > ^{226}\text{Ra}$. Os valores de dose equivalente anual no órgão devido à ingestão de radionuclídeos variaram de órgão para órgão.

Alomari *et al.* [71] mediram os radionuclídeos naturais e artificiais nas culturas de trigo e seu FT de solo para o trigo em relação às propriedades físico-químicas e aos principais elementos do solo. Estimaram a dose efetiva anual e avaliação do impacto na saúde ao longo da vida. Foram coletadas 39 amostras de trigo e solo, cobrindo 4 tipos de solo da Jordânia. Foram utilizados um detector HPGe para espectrometria e software Genie-2000. A dose efetiva anual média e o risco de vida devido à ingestão de ^{40}K e ^{226}Ra em grãos de trigo foram superiores à média global. Não foram detectadas concentrações de atividades de ^{228}Th e ^{137}Cs . Os autores esperam que os resultados sirvam como dados de referência, ajudando a determinar possíveis alterações na radioatividade ambiental.

Azeez *et al.* [72] determinaram as concentrações de atividade de nuclídeos radioativos de ocorrência natural em plantas e solos correspondentes, coletados de estufas e campos agrícolas na cidade de Erbil, na região do Curdistão Iraquiano. Foram determinadas as concentrações de atividade de ^{40}K , ^{226}Ra e ^{228}Th . Essas medições foram usadas para determinar as FTs solo-planta das culturas. Além disso, foram estimadas as doses anuais efetivas do consumo das plantas. Os FTs do solo-planta para ^{40}K foram significativamente maiores do que aqueles para ^{226}Ra e ^{228}Th . Os FTs do solo-planta para ^{226}Ra foram ligeiramente maiores do que aqueles para ^{228}Th . A maior dose efetiva anual deveu-se ao consumo do grão de trigo. A dose de radiação devido ao consumo de plantações na região do Curdistão iraquiano foi menor do que a dose efetiva anual média de ingestão global de $290 \mu\text{Sv/ano}$ (UNSCEAR [1]).

Salih [73] teve como objetivo avaliar os níveis de radioatividade natural em amostras vegetais e os riscos radiológicos de vegetais coletados em Kirkuk, Iraque, por

espectrometria gama com uso de um detector HPGe. Os resultados da pesquisa mostraram que as atividades médias específicas para ^{40}K , ^{226}Ra e ^{228}Th nas amostras ficaram abaixo da exposição relatada pela UNSCEAR. Os valores calculados para dose efetiva média anual total em amostras de vegetais para adultos, crianças (10 anos de idade) e bebês e também do índice de perigo externo e interno foram considerados seguros.

3

Fundamentação Teórica

3.1 Radiações ionizantes

Segundo Gonçalves e Almeida [74], núcleos atômicos podem apresentar determinadas combinações de nêutrons e prótons que formam núcleos estáveis, denominados isótopos estáveis. Em outras combinações, formam núcleos instáveis, denominados isótopos radioativos ou radioisótopos. Um nuclídeo, átomo caracterizado por um número atômico e um número de massa (Okuno e Yoshimura) [75], pode apresentar desequilíbrio entre o número de prótons e de nêutrons; neste caso, o núcleo instável sofre decaimento radioativo, emitindo energia em forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas até atingir a estabilidade (GONÇALVES e ALMEIDA [74]).

Há vários tipos de radiação, com diferentes características. As mais comuns são: alfa, beta, gama e neutrons (IAEA [76]). O Quadro 3.1 apresenta um resumo com as características de cada uma delas.

Quando a radiação tem energia suficiente, pode arrancar elétrons dos átomos da matéria com a qual teve interação, formando íons. Nesses casos, a radiação é classificada como ionizante. A ionização ocorre devido ao processo de deposição de energia no meio em que a radiação ionizante atravessa (OKUNO; VILELA [78]). A retirada dos elétrons pode acontecer de forma direta ou indireta, no caso da primeira, uma partícula carregada energética ao penetrar no meio provoca a ionização dos átomos, perde energia à medida que sofre múltiplas interações até parar. A ionização indireta é provocada por partículas neutras ou ondas eletromagnéticas enérgicas, que perdem quase toda energia na interação, produzindo partículas carregadas que vão ionizar os átomos que estiverem em sua trajetória (OKUNO [77]).

Radiação	Características
Alfa	• Partícula pesada e carregada. • Pode ser bloqueada por uma folha de papel e pela pele. • Se um alfa-emissor for inalado ou ingerido, pode causar danos.
Beta	• Partícula carregada – elétron (–) ou pósitron (+). • Mais penetrante que a alfa, pode atravessar 1–2 cm de água. • Pode ser barrada por alguns milímetros de alumínio.
Gama	• Onda eletromagnética. • Dependendo da energia, pode atravessar o corpo humano ou ser bloqueada por concreto ou chumbo.
Nêutrons	• Partículas sem carga. • Não ionizam diretamente. • Sua interação pode liberar alfa, beta, gama ou raios X. • São penetrantes. • Bloqueados com materiais ricos em hidrogênio como parafina e água.

Fonte: Adaptado de IAEA [76]; OKUNO [77]

Quadro 3.1: Características dos tipos mais comuns de radiação.

3.2 Interação da radiação com a matéria

Quando a radiação com capacidade de ionizar passa pela matéria, além da retirada de elétrons dos átomos, estes também podem ser excitados. A ionização e a excitação são decorrentes da deposição de energia durante a interação da radiação com o meio material (OKUNO [75] e YOSHIMURA [79]).

As formas de interação entre as radiações e a matéria são bastante distintas. Por exemplo, o poder de penetração da radiação ionizante depende da sua energia (CARDOSO [63]). Por exemplo, partículas alfa e beta com a mesma energia possuem poder de penetração na matéria e alcances diferentes (OKUNO [77]).

De acordo com Yoshimura [79], na faixa de energia da radiação gama, há várias possibilidades de interação com o átomo, com os elétrons atômicos, com o núcleo, mas pode acontecer de a radiação atravessar a matéria sem modificá-la e sem ser modificada. A probabilidade de interação e não-interação depende das características do meio e da radiação.

Segundo Cardoso [63], dos vários processos de interação da radiação gama com a matéria, três são importantes na detecção desta radiação emitida por radionuclídeos: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares.

No efeito fotoelétrico, o raio gama incidente desaparece ao interagir com um átomo, resultando na ejeção de um elétron. Neste processo, o átomo recua com baixa energia cinética. Para fótons gama com energia suficiente, a origem mais provável do fotoelétron é a camada mais fortemente ligada, ou camada K , do átomo. A energia cinética do fotoelétron ejetado, E_{e^-} , conforme ilustrado na Equação 3.1, é dada pela diferença entre a energia do fóton incidente, $h\nu$, e a energia de ligação do elétron, E_b , em questão (LAMARSH e BARATTA [80]; KNOLL [81]).

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (3.1)$$

A vaga criada pela ejeção do elétron é rapidamente preenchida pela captura de um elétron livre do meio e/ou rearranjo de elétrons de outras camadas do átomo. Com isso, um ou mais fótons de raios X característicos podem ser gerados. Esses raios X podem ser reabsorvidos nas proximidades do local onde foram gerados, de forma que sua migração ou escape pode influenciar a resposta dos detectores de radiação (KNOLL [81]).

Segundo Knoll [81], a interação por efeito fotoelétrico é predominante para raios gama (ou raios X) de energia relativamente baixa. O processo é intensificado para materiais de alto número atômico do material absorvedor. Essa dependência da probabilidade de absorção do fóton com o alto número atômico do absorvedor, por exemplo, o chumbo, é razão para o uso de materiais com esta característica nas

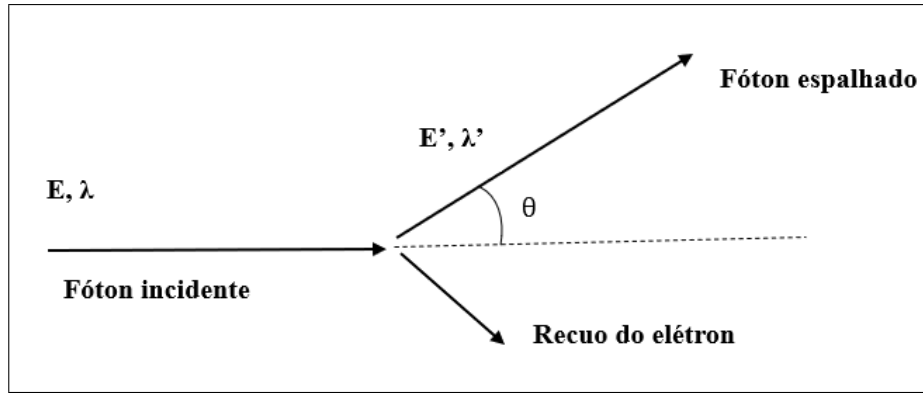


Figura 3.1: Esquema ilustrativo do efeito Compton.

Fonte: Adaptado de LAMARSH e BARATTA [80]

blindagens contra radiação gama, como nos detectores para espectrometria gama.

De acordo com Lamarsh e Baratta [80], o efeito Compton, ou espalhamento Compton, consiste no espalhamento elástico de um fóton por um elétron, processo no qual tanto a energia quanto o momento linear são conservados. A Figura 3.1 ilustra um fóton incidente com energia E e comprimento de onda λ , que é espalhado com ângulo θ .

Conforme Knoll [81], a probabilidade de ocorrência do espalhamento Compton aumenta com o número de elétrons disponíveis para interação no material alvo. Desta forma, a probabilidade de espalhamento Compton aumenta linearmente com o número atômico.

O terceiro processo de interação da radiação gama com a matéria a ser considerado, é a produção de pares, que consiste na conversão do fóton em matéria. Para isso, a energia dos raios gama deve ter, pelo menos, o dobro da energia da massa de repouso de um elétron $2 \times (0,511) = 1,022$ MeV. Acima desse limite, a probabilidade de ocorrer a produção de pares aumenta constantemente com o aumento da energia (Knoll [81]; Lamarsh e Baratta [80]; Murray [82]). Esse mecanismo de interação é predominante à medida que a energia aumenta, na faixa de muitos MeV. Na interação, que deve ocorrer na presença de um campo coulombiano de um núcleo, o fóton desaparece e é substituído por um par elétron-pósitron (Knoll [81]).

Após a formação do par, elétron e pósitron perdem energia no meio absorvente. Então o pósitron se combina com um elétron, as duas partículas desaparecem e dois fótons são produzidos (radiação de aniquilação), cada um com energia de 0,511 MeV. A radiação de aniquilação tem um papel importante na resposta dos detectores de raios gama (Knoll [81]; Lamarsh e Baratta [80]).

O predomínio de cada uma das interações da radiação gama com a matéria está representado na Figura 3.2, que mostra a probabilidade de ocorrência de acordo com o número atômico e a energia. A linha à esquerda representa a energia, em

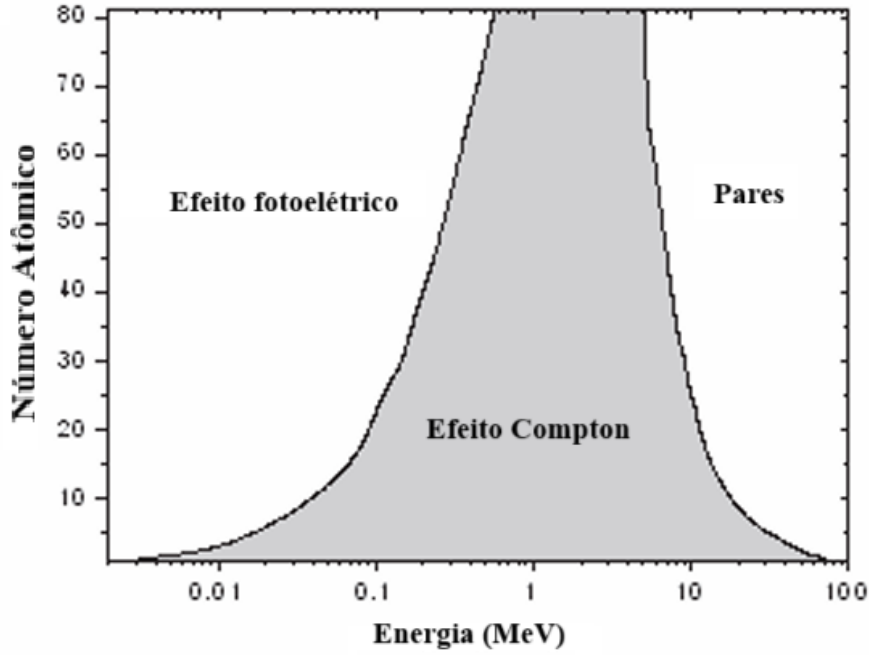


Figura 3.2: Probabilidade de ocorrência dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares.

Fonte: Adaptado de YOSHIMURA [79]

função do número atômico, na qual o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton são igualmente prováveis. A linha da direita representa a energia e o número atômico nos quais o espalhamento Compton e a produção de pares são igualmente prováveis. O efeito Compton predomina para todos os elementos para as energias intermediárias (YOSHIMURA [79]; KNOLL [81]).

3.3 Decaimento radioativo

O decaimento radioativo, ou desintegração nuclear, é um processo natural de emissão espontânea de partículas alfa (α), beta (β), radiação gama (γ), com liberação de energia, que ocorre em núcleos instáveis.

Segundo Okuno e Yoshimura [75], a estabilidade do núcleo está vinculada ao equilíbrio entre forças nucleares entre os pares próton-próton, próton-nêutron, nêutron-nêutron e a força de repulsão coulombiana entre os prótons. Em um núcleo estável, a força nuclear supera a força coulombiana, mantendo o núcleo coeso. À medida que o número atômico cresce, o número de nêutrons torna-se maior que o de prótons, uma vez que a força de repulsão entre estas partículas aumenta. A velocidade com que uma substância radioativa se desintegra é regida por uma lei, denominada “lei de decaimento” (MURRAY [82]). Embora seja impossível prever quais núcleos, ou nuclídeos, radioativos de uma amostra vão decair, a taxa de decaimento obedecerá

a Equação 3.2:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (3.2)$$

Onde, dN/dt é a taxa de variação do número de núclídeos (N) por unidade de tempo (t) e λ é a constante de decaimento, que representa a probabilidade de um núcleo desintegrar-se espontaneamente por unidade de tempo. É importante destacar que a constante de decaimento, que é característica de cada radionuclídeo, não depende do número de núclídeos nem de sua idade.

O número negativo significa que o número de núclídeos decresce com o aumento do tempo. Usando a separação de variáveis, a Equação 3.2, pode ser escrita como a Equação 3.3:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (3.3)$$

Integrando,

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (3.4)$$

Obtém-se:

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0) \quad (3.5)$$

Onde N_0 é o número de núclídeos no instante $t = 0$. Fazendo $t_0 = 0$, obtém-se:

$$\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) = -\lambda t \quad (3.6)$$

Tomando a exponencial de ambos os lados, tem-se a Equação 3.7, lei fundamental do decaimento radioativo.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3.7)$$

O decaimento radioativo obedece a uma lei exponencial de forma que o número de núcleos radioativos, N , nunca se iguala a zero, entretanto, se torna cada vez menor (ANDREUCCI [83]).

A taxa de decaimento, ou seja, o número de decaimentos por unidade de tempo de uma amostra radioativa, é denominada Atividade, A , e é dada pela Equação 3.8:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3.8)$$

Onde A_0 é a atividade no tempo $t = 0$.

A unidade da Atividade, no Sistema Internacional, é o becquerel (Bq), sendo

que $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ (uma desintegração por segundo). Esta unidade substituiu o curie (Ci), que corresponde ao número de desintegrações por segundo de 1 g de ^{226}Ra . Assim,

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

O tempo durante o qual a atividade cai pela metade é denominado como meia-vida, e seu símbolo é $T_{1/2}$, apresentando esta definição:

$$A(T_{1/2}) = \frac{A_0}{2} \quad (3.9)$$

Pela Equação 3.9 tem-se:

$$\frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (3.10)$$

Resolvendo a equação 3.10 tem-se a meia-vida, $T_{1/2}$, de um radioisótopo com constante de decaimento, λ (LAMARSH e BARATTA [84]):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3.11)$$

A Figura 3.3 mostra a função de decaimento de uma amostra radioativa.

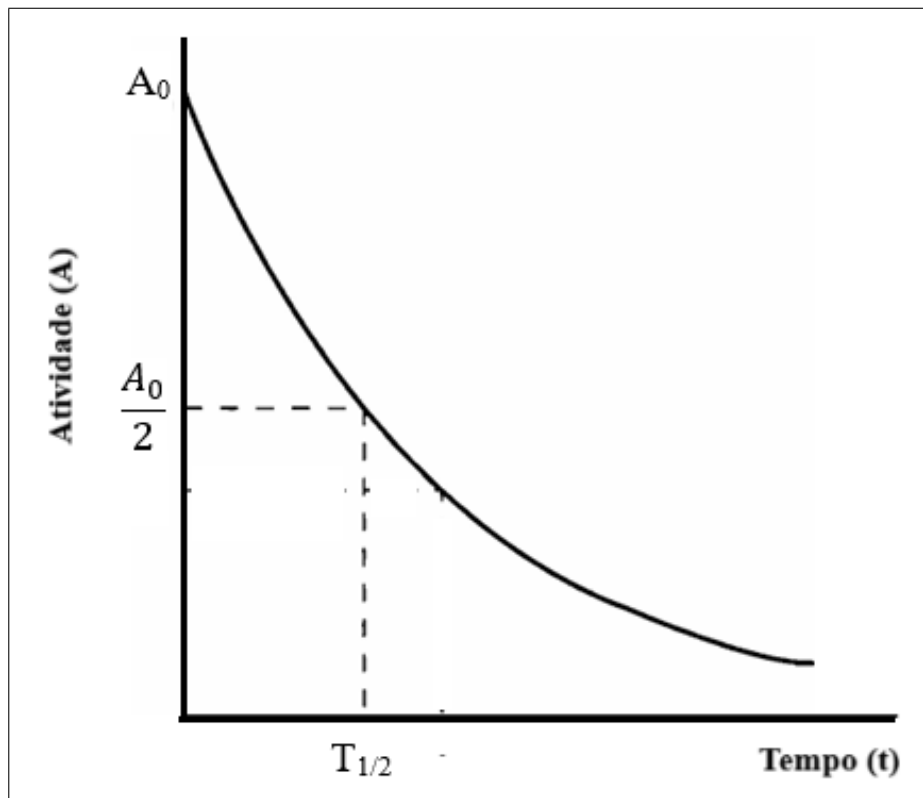


Figura 3.3: Esquema ilustrativo do efeito Compton.

Fonte: Modificado de LAMARSH e BARATTA [80].

3.4 Séries radioativas

A transmutação natural é um processo no qual um elemento instável emite partículas ou ondas eletromagnéticas para se tornar um elemento estável. As séries radioativas correspondem às sequências de decaimentos radioativos.

Os radionuclídeos terrestres são denominados radionuclídeos primordiais. Dentre eles se destacam os ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , que dão origem a três séries radioativas naturais, e o ^{40}K . Estas séries são responsáveis pela maior parte da radioatividade da crosta terrestre (SANTOS [85]).

Na Figura 3.4 estão representadas as séries de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th . Em destaque azul estão os radionuclídeos mensuráveis por espectrometria gama.

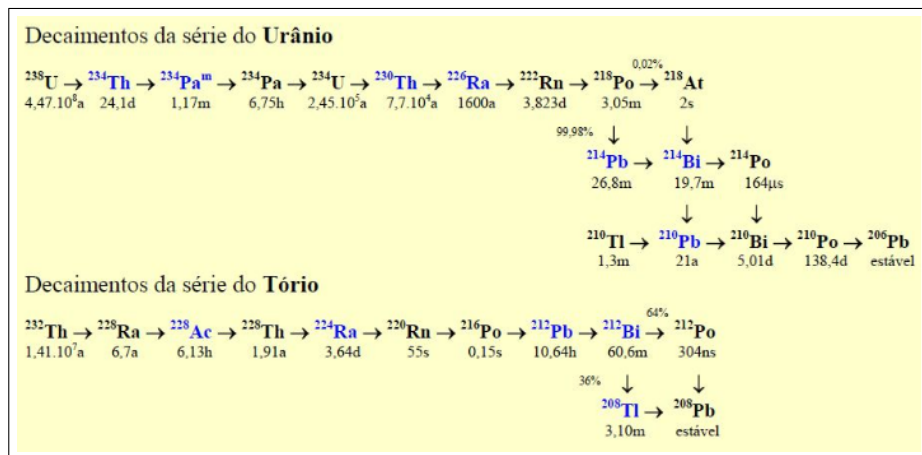


Figura 3.4: Decaimento das séries do ^{238}U e do ^{232}Th .

Fonte: Modificada de CARDOSO [63].

3.5 Radionuclídeos naturais

Os radionuclídeos naturais existem no planeta desde a sua formação. Estes radionuclídeos decaem emitindo diferentes tipos de radiação até se converterem em elementos estáveis. Como os tempos de decaimento são diferentes, os radionuclídeos permanecem até hoje desde a constituição da Terra (QST). A Figura 3.5 mostra uma representação da transformação dos radionuclídeos ao longo do período de existência do planeta.

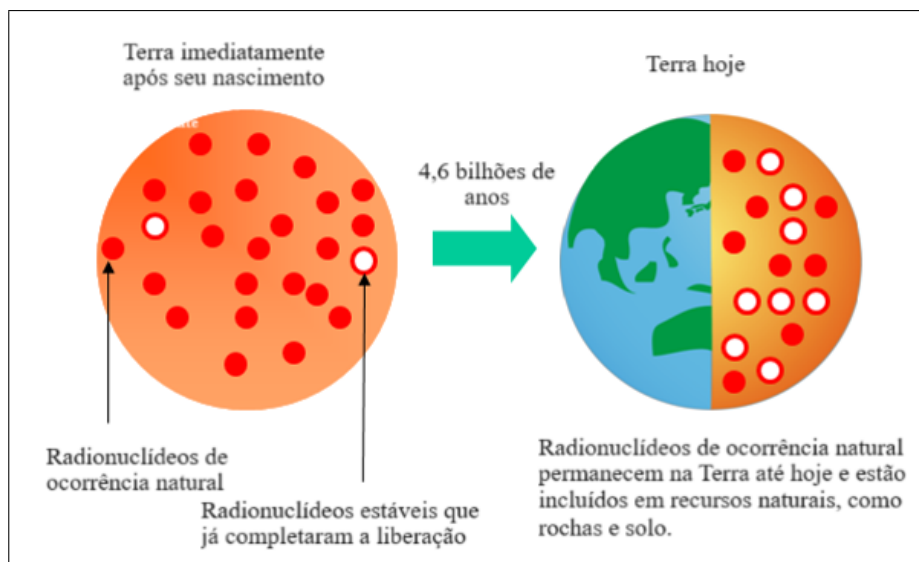


Figura 3.5: Radionuclídeos naturais desde o nascimento da Terra.

Fonte: QST [86] modificada.

A superfície terrestre é protegida da radiação cósmica pelo campo magnético e pela atmosfera. O primeiro faz com que a intensidade da radiação seja maior nos polos, onde há menos habitantes, e a segunda atenua a radiação cósmica, de forma que a intensidade diminui de acordo com o decréscimo da altitude (OKUNO [77]).

As radiações cósmicas provenientes do sol e do espaço representam fontes de exposição externa. A inalação de gás radônio conduz a uma exposição interna que varia significativamente de local para local, dependendo da natureza dos edifícios e da geologia local. Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM), da sigla em inglês, estão presentes nos alimentos e na água e contribuem para a exposição interna. Estas exposições oriundas de fontes naturais são responsáveis pelas doses de radiação recebidas por todos os seres vivos do planeta (UNSCEAR [87]; OKUNO [77]). A Tabela 3.1 apresenta um resumo das doses efetivas recebidas de fontes naturais de radiação.

Tabela 3.1: Doses anuais devido a fontes naturais de radiação

Fonte da radiação	Dose média anual (mSv)	Típico intervalo anual (mSv)
Inalação (radônio)	1,26	0,2–10
Terrestre externa	0,48	0,3–1
Ingestão	0,29	0,2–1
Raio cósmico	0,39	0,3–1
Total natural	2,4	1–13

Fonte: Modificada de UNSCEAR [87].

De acordo com INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) [88] mais de 90% da dose pode ser atribuída aos radionuclídeos naturais presentes nos alimentos e o restante aos que se encontram na água potável.

Segundo Okuno e Yoshimura [75], a dose efetiva é usada para estabelecer limites de dose para o corpo todo. A grandeza é medida em Sv (sievert), sendo $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. A dose efetiva comprometida é válida nos casos de incorporação dos radionuclídeos por ingestão ou inalação.

A entrada de material radioativo no organismo é expressa em becqueréis. Um becquerel (Bq) representa uma desintegração de um átomo radioativo por segundo. A dose de radiação por ingestão é expressa em sieverts e é avaliada utilizando a concentração de radioatividade nos alimentos, na água ou no ar (Bq/kg ou Bq/L ou Bq/m^3), a taxa de ingestão, o metabolismo do radionuclídeo específico e a sua meia-vida.

A ICRP estabelece o limite de exposição do público em geral às radiações ionizantes de 1 mSv por ano, excluindo a radiação natural de fundo. A Figura 3.6 apresenta doses de radiação devido às fontes comuns de radiação ionizante.

responsável por 14% da exposição à radiação natural (CARNEIRO [91]).

Segundo Zorb [92], a maior parte do potássio, por estar incorporada à estrutura cristalina dos minerais ou associada a compostos como argila, não está diretamente disponível para absorção pelas plantas. A disponibilidade do potássio varia muito de acordo com o tipo de solo e, devido à complexidade da sua dinâmica, costuma ser classificada em grupos como mostra o Quadro 3.2.

Disponibilidade do K para as plantas	Características
Solúvel em água	Diretamente disponível e sujeito à lixiviação.
Trocáveis	Ligado eletrostaticamente à superfície externa de minerais argilosos e substâncias húmicas.
Não-trocáveis	Fontes lentas e fontes não disponíveis de potássio. Consideradas reservatórios a longo prazo.
Estruturais	Presente na estrutura cristalina dos minerais, geralmente indisponível para as plantas em curto prazo.

Fonte: Elaboração própria com base em SPARKS [93]; ZORB ET AL. [92] e NUNES [94].

Quadro 3.2: Disponibilidade do potássio de acordo com o tipo de solo.

As diferentes formas de potássio no solo são interconvertidas por processos de liberação e fixação, como mostra a Figura 3.7. A quantidade de potássio disponível depende do intemperismo, tempo de deposição e tipo de minerais argissolos presentes no solo. Parte do potássio está na forma estrutural composta por minerais primários contendo moscovita e feldspato potássico. Os feldspatos potássicos podem liberar diretamente o potássio para solução do solo. Já a camada intermediária das micas é mantida por forças eletrostáticas. Tanto os feldspatos quanto as micas podem produzir, por intemperismo, minerais secundários, potenciais fontes de potássio disponível no solo para as plantas. A quantidade de potássio liberada pela forma trocável costuma ser muito menor do que a quantidade absorvida pelas plantas (ZORB [92]; HAFSI ET AL. [90]; SPARKS ET AL. [93]).

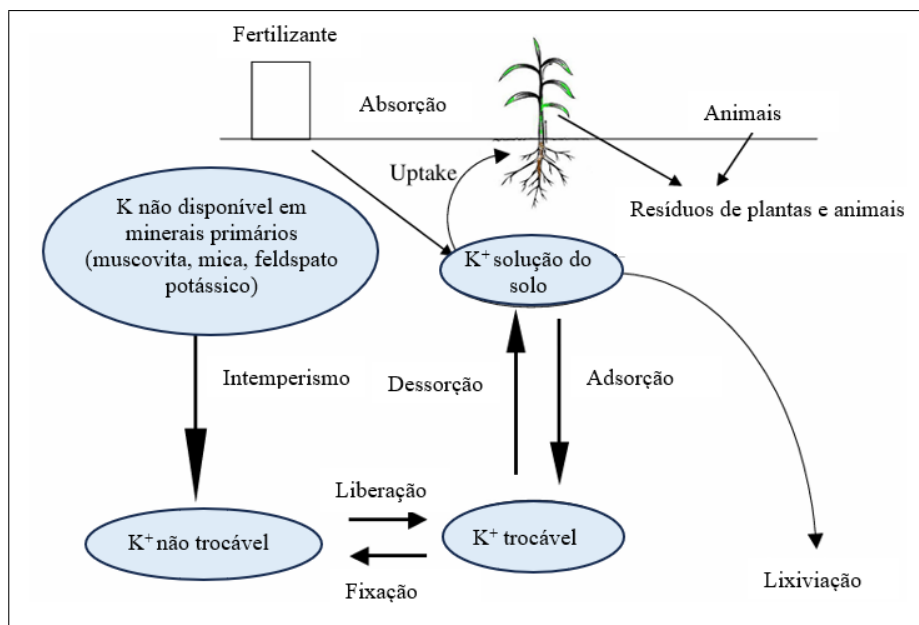


Figura 3.7: Ciclo do K no solo.

Fonte: Adaptado de HAFSI ET AL. [90]

Segundo Nunes [94], o potássio é importante na regulação osmótica das células vegetais, influencia a produtividade dos vegetais e auxilia no sistema de defesa dos mesmos.

Dos três isótopos do elemento potássio, somente o ^{40}K é radioativo, é um macro nutriente essencial para as plantas mantidas em equilíbrio homeostático e ajuda as plantas a regularem a absorção de elementos essenciais do solo e também é muito importante na dieta alimentar humana. No corpo humano se localiza nos músculos. A atividade do ^{40}K em uma pessoa com 70 kg é da ordem de 3700 Bq, ou seja, são 3700 desintegrações por segundo no corpo. O ^{40}K é responsável por uma dose anual de 0,17 mSv para adultos e de 0,19 mSv para crianças, sendo o que mais contribui (cerca de 60 a 70%) para a dose natural interna (AL-MASRI [95]; OKUNO [77]; UNSCEAR [87]).

O ^{40}K decai para o ^{40}C por emissão beta sem radiação gama associada (89% das vezes) e para o gás ^{40}Ar por captura eletrônica com emissão de um raio gama energético (aproximadamente 11% das vezes). É um radionuclídeo importante em termos de dose associada aos radionuclídeos de ocorrência natural. O ^{40}K não está incluído nas séries radioativas, mas seu mecanismo de transição é importante para este trabalho. A Figura 3.8 mostra um esquema de decaimento do ^{40}K .

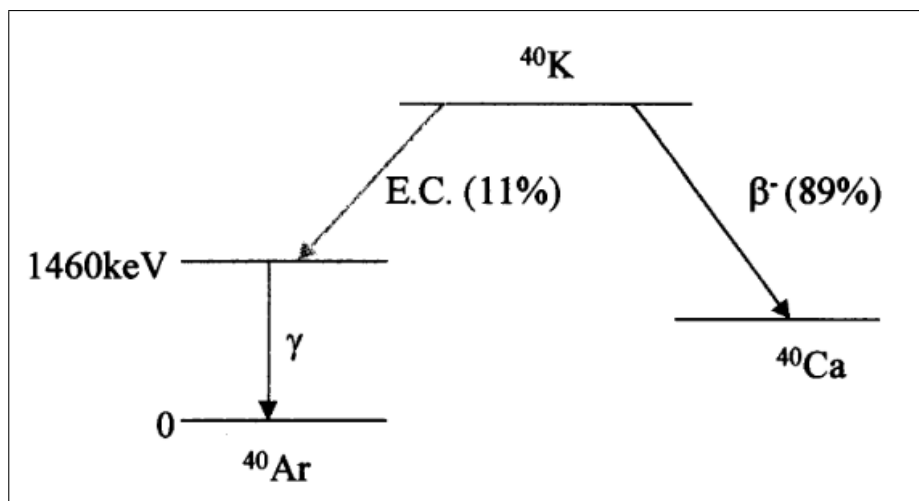


Figura 3.8: Esquema de decaimento do ^{40}K .

Fonte: SCHEIBEL [96].

3.5.2 Rádio

O rádio é um metal alcalino-terroso divalente, produzido pelo decaimento radioativo do urânio e do tório e ocorre principalmente em rochas que contêm esses elementos (KUMAR [97]).

Segundo Nogueira [98] e Negrão [99], quimicamente o rádio reage de forma semelhante a outros íons alcalino-terrosos tais como cálcio e estrôncio e é mais semelhante ao bário. A solubilidade do elemento é controlada pela adsorção superficial, reações de dissolução e precipitação. Sob o aspecto da radiotoxicidade, é considerado um dos mais importantes radionuclídeos de ocorrência natural.

Os radionuclídeos analisados neste estudo são ^{226}Ra e ^{228}Ra . Estes isótopos possuem comportamento químico semelhante ao cálcio no corpo humano, causando exposição interna por se acumularem nos ossos e, assim, podem desenvolver processos carcinogênicos. As meias-vidas dos elementos ^{226}Ra e ^{228}Ra são de 1600 anos e 5,75 anos, respectivamente (NOGUEIRA [98]; TEIXEIRA [100]).

De acordo com Kumar [97], entre os quatro isótopos do rádio de ocorrência natural, o ^{226}Ra é o isótopo mais abundante.

O rádio se encontra em baixas concentrações na natureza; suas maiores concentrações se encontram em minerais que contêm urânio e tório.

O ^{226}Ra está presente em quantidade variável em rochas e solos. Nas rochas, estes radionuclídeos encontram-se geralmente em equilíbrio radioativo com o ^{238}U (EISENBUD e GESELL [101]).

Nos alimentos, o ^{226}Ra e ^{228}Ra estão presentes nas plantas que são os receptores primários e sujeitos à contaminação direta e indireta. A contaminação direta refere-se à deposição dos materiais radioativos da atmosfera diretamente nas partes

superficiais das plantas e a contaminação indireta refere-se à porção dos radionuclídeos a partir de suas raízes. Os animais são os receptores secundários quando consomem as plantas em sua dieta.

Os fatores determinantes para a transferência dos radionuclídeos para as raízes são: a argila, o conteúdo de matéria orgânica e o pH (Potencial hidrogeniônico) do solo e a capacidade de troca de cátions (UNSCEAR [1]).

Entre os radionuclídeos naturais, o rádio é o elemento com maior potencial de transferência entre os diversos compartimentos ambientais. Diferente do urânio e do tório, o rádio é solúvel e pode facilmente sofrer lixiviação nos solos e formar compostos que podem ser absorvidos por plantas e animais, sofrer metabolismo como o cálcio e, posteriormente, ser depositados no tecido ósseo (RIBEIRO [62]; CARDOSO [63]).

Segundo D'Souza *et al.* [102], considerando períodos comparáveis, a acumulação de ^{226}Ra nas raízes é de 2 a 3 vezes menor do que a de outros radionuclídeos analisados no estudo (^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po); entretanto, aponta que a diferença significativa entre o Ra e outros radionuclídeos está na extensão do seu transporte ascendente, que é de 50 a 200 vezes maior. No mesmo estudo, D'Souza *et al.* [102] verificam que a evidência da transferência relativamente rápida do ^{226}Ra para partes aéreas das plantas provavelmente é o radionuclídeo que mais contribui para a radioatividade nos tecidos aéreos das plantas sob condições de cultivo em que a absorção pelas raízes seja a principal via de entrada de radionuclídeos.

3.5.3 Tório

O tório é amplamente distribuído no ambiente e ocorre em baixa concentração na água, no solo, nas rochas, nas plantas e nos animais. O ^{232}Th é o principal isótopo radioativo de meia-vida física de $1,4 \times 10^{10}$ anos. Esse radionuclídeo é um emissor alfa com energia de 4,01 MeV (77,8%) e 3,95 MeV (22,1%). Sua emissão gama possui energia de 63,8 keV (0,267%) (EISENBUD e GESELL [101]; NADALETI [103]).

Quanto à mobilidade, o tório quase não forma compostos solúveis e por ser menos solúvel que o urânio e o potássio, não apresenta boa mobilidade, a não ser por meios mecânicos como vento ou erosão (SANTOS JUNIOR [104]).

Os riscos radiológicos de elementos para a saúde humana podem ser classificados em radiológicos e químicos. Os riscos radiológicos do ^{232}Th estão associados à radioatividade de seus descendentes, principalmente ao ^{228}Ra pertencente a esta série de decaimento radioativo.

No corpo humano, os isótopos de tório tendem a se concentrar no fígado, nos rins, no baço e na medula óssea. Sua toxicidade química é relativamente baixa.

3.6 Equilíbrio secular

Na natureza, processos geológicos influenciam a dinâmica dos radionuclídeos de amostras ambientais. Quando um ou mais produtos de decaimento de uma série são removidos completamente do sistema, ocorre o desequilíbrio radioativo. Entretanto, quando um radionuclídeo pai possui meia-vida maior que qualquer um dos seus filhos, pode-se estimar a atividade da amostra mediante o conceito de equilíbrio radioativo secular. Na série do tório, esse desequilíbrio ocorre raramente e não há problemas com o potássio (XAVIER [105]; SANTOS [106]).

A relação entre a atividade e o número de átomos radioativos é dada pela Equação 3.12. Aplicando esta expressão para radionuclídeos pai (índice “1”) e filho (índice “2”), e considerando os índices superiores “0” indicando tempo inicial, tem-se:

$$A = \lambda N \quad (3.12)$$

$$A_1 = \lambda_1 N_1 = A_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (3.13)$$

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = N_1^0 \cdot \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.14)$$

$$A_2 = A_1^0 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.15)$$

Da Equação 3.15, tem-se que a constante de decaimento é $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$. Em um sistema fechado onde a meia-vida do radionuclídeo pai é muito maior que a do radionuclídeo filho, $\lambda_1 \ll \lambda_2$, considera-se $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$. Desta forma a Equação 3.15 pode ser expressa por:

$$A_2 = A_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.16)$$

No equilíbrio secular, a atividade do filho é igual a do pai, assim a Equação 3.16 é expressa pela Equação 3.17:

$$A_2 = A_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad (3.17)$$

O equilíbrio secular é uma condição na qual, em um sistema fechado, as atividades de todos os produtos de decaimento passam a ser iguais às do isótopo que deu origem à série. O tempo necessário para atingir efetivamente o equilíbrio secular é 7 vezes a meia-vida mais longa de qualquer produto de decaimento da cadeia (KETCHAM [107]).

3.7 Radionuclídeos em alimentos

Todos os alimentos contêm radionuclídeos naturais, transferidos do solo e da água para os alimentos, como vegetais e peixes. As concentrações de radionuclídeos naturais nos alimentos e na água potável geralmente são seguras para o consumo humano. No entanto, os valores podem variar consideravelmente de acordo com a geologia local, clima e práticas agrícolas (DIXIT [108]).

Os exemplos mais conhecidos de radionuclídeos em alimentos são bananas e castanhas-do-pará. As bananas são boas fontes de potássio e como uma fração da quantidade deste elemento presente na natureza é radioativa. Desta forma, o consumo de uma banana forneceria 0,1 μSv de radiação, quantidade esta muito pequena (EPA [109]).

A concentração de radioatividade natural nos alimentos, frequentemente, está na faixa de 40 a 600 Bq/kg. Por exemplo, a concentração de atividade somente do potássio, normalmente, pode ser 50 Bq/kg no leite, 420 Bq/kg no leite em pó, 165 Bq/kg nas batatas e 165 Bq/kg na carne bovina (IAEA [110]).

Uma vez presentes na crosta terrestre, os radionuclídeos naturais percorrem diversas rotas passando por fontes de água, plantas, animais até sua ingestão pelos seres humanos (CINELLI ET AL. [111]). A Figura 3.9. ilustra as variadas rotas desses radionuclídeos desde o meio ambiente até a incorporação por inalação ou ingestão, resultando em exposições externas e internas.

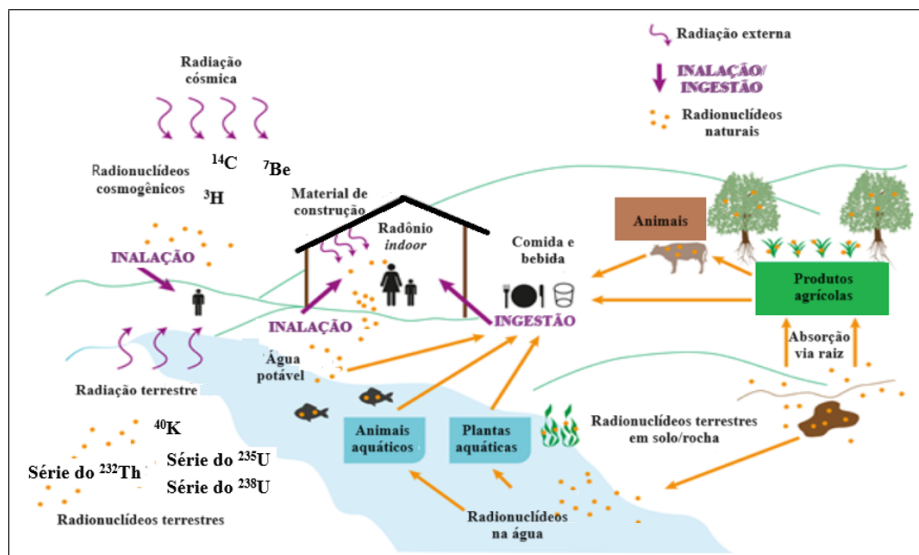


Figura 3.9: Rotas dos radionuclídeos naturais no meio ambiente e exposição externa e interna

Fonte: Modificada de CINELLI ET AL. [111]

3.8 Fator de transferência solo-planta

O estudo da radioatividade natural geralmente tem como objetivo a obtenção de informações sobre os níveis atuais de poluentes nocivos despejados no meio ambiente. A migração e a acumulação de contaminantes em solos cultiváveis são complexas, envolvendo processos como lixiviação, ascensão capilar, escoamento superficial, sorção, absorção radicular e ressuspensão na atmosfera. Além desses, outros aspectos controlam a migração do radionuclídeo no solo e sua absorção pela planta, como as propriedades físico-químicas do radionuclídeo, características do solo, espécies, teor de argila, capacidade de troca catiônica, pH do solo, entre outros (AL-KHAROUF ET AL. [112]; TOME e LOZANO [113]).

O solo tem um papel importante nos processos de interação entre os radionuclídeos e a absorção destes pelas plantas. De acordo com Forkapic *et al.* [114]; Abojassim *et al.* [115] e Santos *et al.* [116], o solo é um material constituído por componentes minerais e orgânicos, partes sólidas, líquidas e gasosas, dispostos em um complicado sistema físico-químico que fornece a base mecânica para as plantas, além de suprir suas necessidades nutricionais.

A fase sólida do solo compreende uma fração mineral e inorgânica, proveniente da rocha-mãe, e uma parte orgânica oriunda de restos de vegetais e animais. A componente líquida do solo, solução do solo, é derivada de chuvas ou ação do homem. Essa fase do solo é constituída por minerais e compostos orgânicos. A água presente no solo é um importante vetor na transferência tanto de nutrientes quanto de poluentes no sistema solo-planta (SANTOS [117]).

O ar presente no solo é semelhante ao atmosférico, entretanto, a quantidade de O_2 é reduzida e a de CO_2 aumentada devido à respiração das raízes das plantas e de micro-organismos (SANTOS [117]). A Figura 3.10 mostra a composição aproximada de um solo típico.

O solo é complexo e dinâmico, desta forma, a composição apresentada acima pode variar diariamente a depender de vários fatores como suprimento de água e prática de cultivo (UNIVERSITY OF HAWAII [118]).

Entre os componentes do solo, a matéria orgânica tem sua dinâmica governada pela adição de resíduos orgânicos de diversas naturezas, que é continuamente modificada por processos como atividade biológica e fatores químicos e físicos (FONTANA [119]). A decomposição da matéria orgânica envolve a mineralização e a humificação. As substâncias húmicas, um dos produtos finais do processo de decomposição, possuem elevada capacidade de troca catiônica (BETTIOL [120]). No presente estudo, as amostras analisadas são provenientes de locais de acréscimo de matéria orgânica ao solo com o objetivo de aumentar a fertilidade. Tal prática é um fator de influência das trocas que ocorrem entre os solos e os vegetais.

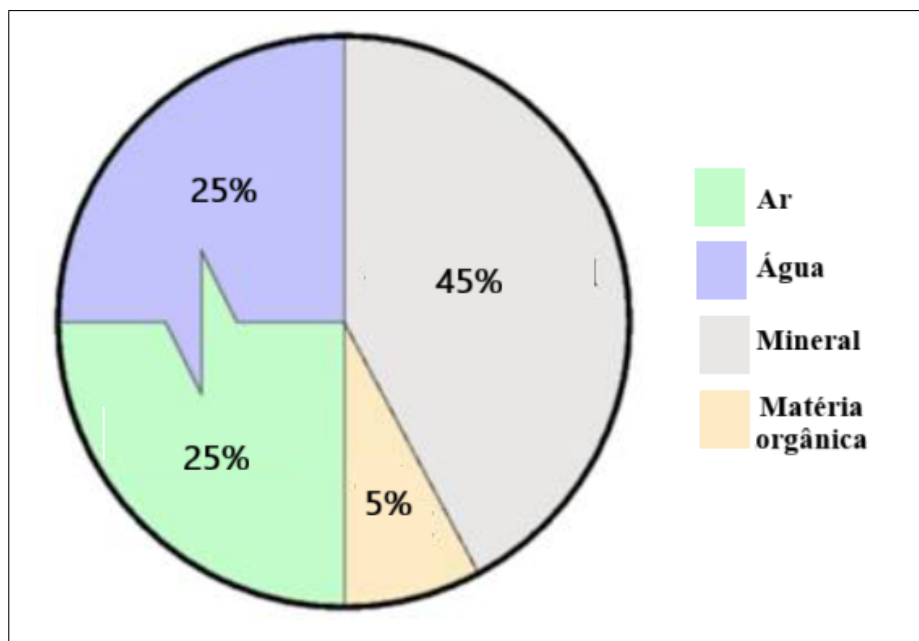


Figura 3.10: Composição aproximada do solo

Fonte: Adaptada de UNIVERSITY OF HAWAII [118].

O valor utilizado para determinar a habilidade de várias espécies de plantas de absorver radionuclídeos do solo ou de outro substrato é definido como fator de transferência, que corresponde à razão entre a concentração de atividade de um dado radionuclídeo no tecido vegetal e a concentração no solo ou outro substrato. O FT é utilizado para prever o transporte de radionuclídeos e outros elementos através da cadeia alimentar, além de ser um parâmetro para prever a presença de contaminantes em sistemas de agricultura (OLIVEIRA [121]; MAKKI ET AL. [122]; MORTVEDT [123]). Geralmente, a concentração de radionuclídeos no solo representa sua concentração total e não a fração disponível para a planta; por consequência, a maioria dos valores de FT é bastante baixa (MORTVEDT [123]). No cálculo do FT é levado em conta a concentração de radionuclídeos na parte comestível da planta e o conteúdo total do radionuclídeo presente no solo (FRISSEL [124]).

Mesmo com tantas variáveis envolvidas na migração dos radionuclídeos do solo para planta o estudo e a obtenção de dados que retratem as concentrações de elementos naturalmente radioativos, que serão incorporados por ingestão, é uma tarefa importante e necessária sob o aspecto do monitoramento dos níveis de radioatividade natural, principalmente porque ao materiais analisados, solo e vegetais, nesta pesquisa, pertencerem à uma UC ambiental.

3.9 Efeitos biológicos da radiação

Segundo Aggarwal [125], a interação da radiação ionizante com o corpo humano pode resultar em danos biológicos e a gravidade depende de fatores como a natureza e a energia da radiação, a dose total e a taxa de dose, a extensão e a parte do corpo exposta, a idade da pessoa exposta, a sensibilidade do órgão à radiação. A interação da radiação ionizante com o corpo humano pode ocorrer por fontes radioativas externas ou por contaminação interna, possibilitando a manifestação clínica de efeitos biológicos.

Os efeitos biológicos da radiação ionizante dependem de vários fatores que os tornam variáveis ou inconsistentes. Os somáticos incluem efeitos precoces (não carcinogênicos) e tardios (carcinogênicos). Os efeitos estocásticos têm caráter probabilístico e são imprevisíveis, geralmente ocorrem após exposição crônica a baixas doses. São exemplos os efeitos hereditários e a carcinogênese após o diagnóstico por imagem. Os efeitos determinísticos têm uma resposta previsível à radiação, que está relacionada à dose, existindo um limiar. Exemplos de efeitos determinísticos são a fibrose pulmonar induzida por radiação e a catarata. A Figura 3.11 apresenta um esquema com os efeitos biológicos de acordo com as classificações baseadas em sua natureza e tempo após a exposição (ELGAZZAR; KAZEM [126]).

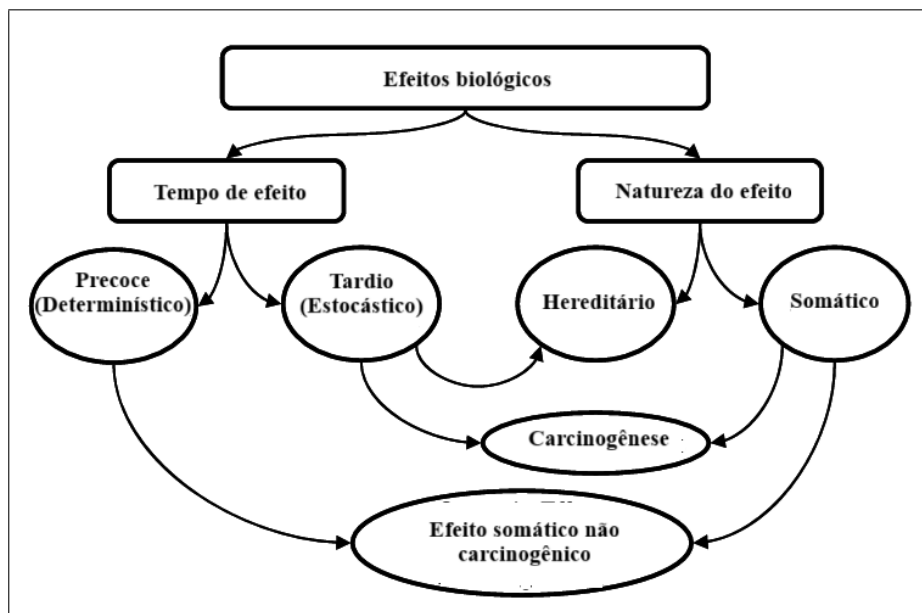


Figura 3.11: Efeitos biológicos da radiação ionizante no corpo humano

Fonte: ELGAZZAR; KAZEM [126]

A radiação ionizante em contato com a água das células do corpo humano pode causar ionização e excitação, resultando na produção de radicais livres. Esses radicais livres reagem com as biomoléculas na célula e resultam em danos às bio-

moléculas na célula, como DNA e proteínas. Esses danos podem levar à inibição da divisão celular, aberrações cromossômicas, mutação de genes e morte celular (AGGARWAL [125]).

3.10 Detectores de radiação ionizante

De acordo com Okuno e Yoshimura [75], um detector de radiação é um equipamento com sensibilidade para detectar a presença da radiação, ou mesmo para quantificá-la. De modo geral, pode-se dizer que os detectores de radiação são transdutores, porque convertem a energia da radiação em um sinal que pode ser medido e é importante que este sinal tenha uma relação simples e unívoca com alguma grandeza relacionada à radiação que a produziu.

Existem vários tipos de detectores de radiação ionizante, cada um atendendo a uma finalidade específica e de acordo com a interação da radiação com o material constituinte do equipamento.

Segundo Okuno e Yoshimura [75], para todos os detectores há características importantes que devem ser conhecidas de forma que a interpretação das respostas produzidas e a aplicação sejam adequadas. Algumas dessas características estão descritas resumidamente nos tópicos abaixo:

- **Eficiência** – relaciona a resposta do detector com a quantidade de radiação que o atinge. Esta é a definição de eficiência intrínseca, que independe da geometria de irradiação. A eficiência depende da energia da radiação e é maior quanto mais interações da radiação com o volume sensível do detector.
- **Exatidão** – também conhecida como acurácia, avalia quanto a resposta do detector se aproxima do valor correto ou verdadeiro. A exatidão só pode ser avaliada por comparação com um “padrão”.
- **Sensibilidade** – característica que pode ser dada pela menor quantidade possível de detecção, ou pela razão entre a variação da resposta e a correspondente variação da quantidade que é medida.
- **Faixa dinâmica** – representa o intervalo de valores da grandeza medida no qual ele produz uma resposta. É comum existir uma saturação do sinal medido, que deixa de variar ou tem variação reduzida a partir de um valor máximo. A saturação indica o limite superior da faixa dinâmica, enquanto a quantidade mínima detectável define o valor limite inferior dessa faixa.
- **Repetibilidade** – característica que determina a precisão do detector, ou seja, indica o quanto os valores obtidos mediante as mesmas condições concordam entre si.

- **Reprodutibilidade** – relaciona as variações dos resultados obtidos quando há mudança no processo, como operador, detector, local, ainda que estes sejam equivalentes.
- **Tempo de resposta** – capacidade de processar como independentes dois sinais não simultâneos, mas separados por curto intervalo de tempo.
- **Resolução** – capacidade de distinguir dois sinais muito próximos, seja em energia, posição ou tempo.
- **Linearidade de resposta** – relação linear entre o sinal do detector e a grandeza medida.

Os detectores também podem ser caracterizados pelo tipo de radiação a ser detectada. Como no presente estudo foi empregado um detector semicondutor, na sequência serão apresentadas algumas características deste tipo de dispositivo.

Conforme Knoll [81] e Tauhata *et al.* [127], detectores de diodo semicondutor ou simplesmente detectores de estado sólido caracterizam dispositivos baseados na coleta de elétron-buraco a partir de meios semicondutores. A rede periódica de materiais cristalinos forma bandas de energia permitidas para os elétrons dentro deste sólido. Três regiões de interesse podem ser estabelecidas, a banda de valência, onde os elétrons estão ligados à rede cristalina, a banda de condução, por onde os elétrons livres podem migrar através do cristal e o intervalo de banda, região que separa as duas primeiras, cujo tamanho determina se o material é classificado como isolante ou semicondutor. Quando a largura da banda é muito pequena, caso dos materiais condutores, os elétrons podem migrar facilmente por todo o material, pois até mesmo a agitação térmica da temperatura ambiente faz com que os elétrons tenham energia para alcançar a banda de condução. Nos isolantes, com intervalo de banda geralmente de 5 eV ou mais, a possibilidade dos elétrons alcançarem a banda de condução é reduzida e nos semicondutores, o intervalo de banda é da ordem de 1 eV, de modo que certas circunstâncias permitem que os elétrons atinjam a banda de condução e o material se comporte como um condutor. A Figura 3.12 apresenta um esquema que representa as bandas de interesse nos isolantes e nos semicondutores, onde E_{ib} indica a energia do intervalo de banda.

A temperaturas diferentes de zero, parte da energia térmica pode ser compartilhada pelos elétrons do cristal e existe a possibilidade de que um elétron de valência ganhe energia suficiente para ser levado à banda de condução. Neste processo é criado um elétron na banda de condução e um buraco na banda de valência. A combinação é chamada par elétron-buraco. O elétron e o buraco, representando carga positiva, podem se mover sob a influência de um campo elétrico aplicado, mas em sentidos opostos (KNOLL [81]).

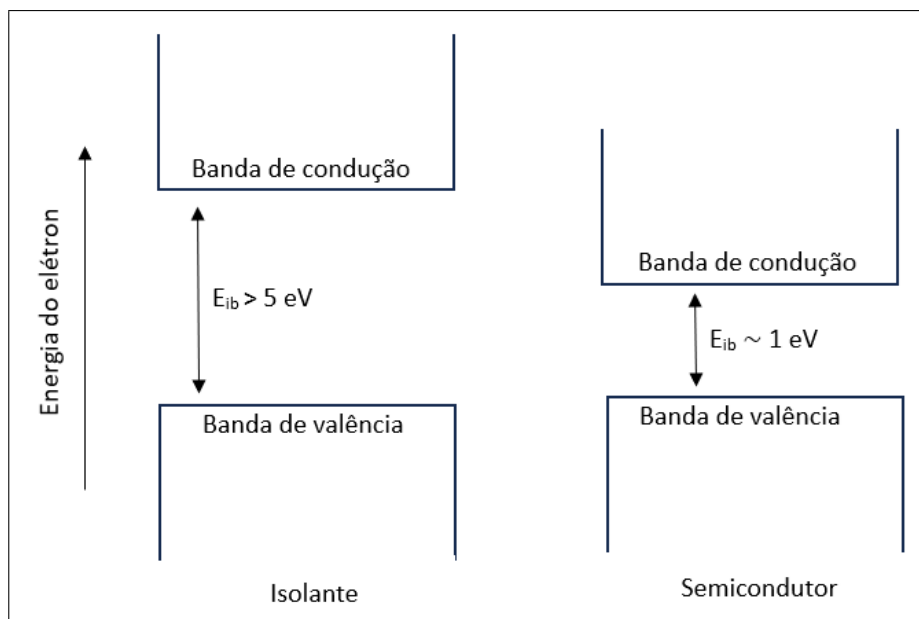


Figura 3.12: Estrutura de bandas para as energias dos elétrons nos isolantes e semicondutores

Fonte: Modificada de KNOLL [81]

A passagem da radiação por um material semicondutor com estrutura de bandas cria um grande número de pares elétron-buraco que são coletados pelo campo elétrico aplicado ao material. A principal vantagem dos semicondutores está na pouca energia necessária para criar um par elétron-buraco, aproximadamente 3 eV para o germânio, em comparação à energia necessária para criação de um par de íons nos gases, aproximadamente 30 eV para um detector a gás (TAUHATA ET AL. [127]). A redução da flutuação estatística e da influência do ruído eletrônico, com melhora na relação sinal-ruído, também é vantagem atribuída aos detectores semicondutores.

O detector HPGe é um detector semicondutor com boa resolução para medidas de raios gama (CATANOSO [128]). De acordo com Khandaker [129] e Cardoso [63], as impurezas inerentes aos materiais semicondutores podem gerar muito ruído, pois, por exemplo, o Ge tem valência 4, de forma que quando existe uma impureza de valência 3 (aceitadora) ou valência 5 (doadora) no cristal, há uma redução na energia necessária para a criação do par elétron-buraco. O cristal de Ge com impureza aceitadora é denominado tipo-p e com a impureza doadora é denominado tipo-n. A solução consiste em criar uma junção p-n que promove a neutralização das cargas de elétrons e buracos, esta região é denominada região depletada. Num detector com estas características, a região depletada corresponde à parte sensível à radiação ionizante, o fluxo de corrente surge com a interação da radiação com esta região. A diferença de potencial de aproximadamente 1 eV é inadequada para a coleta das cargas geradas, portanto, para aumentar a eficiência, um campo elétrico externo é aplicado.

3.11 Sistema de espectrometria

Detectores HPGe são utilizados globalmente para espectroscopia de radiação gama (Dokania *et al.* [130]). Para este sistema têm-se os seguintes componentes acoplados e integrados:

- Detector de germânio (HPGe) vertical que opera com pré-amplificador acoplado com baixo ruído por também estar resfriado.
- Fonte de alta tensão que alimenta o detector e aplica uma tensão de 0 – 5000V.
- Amplificador que amplifica e gera um pulso de forma gaussiana com subida rápida vindo do pré-amplificador.
- Analisador multicanal (MCA – *Multichannel Analyser*).
- Blindagem para o detector, constituída de chumbo, com uma geometria adequada para acomodar a amostra.
- Microcomputador para instalação do MCA e do software para armazenamento dos dados (FERREIRA [131]).

A Figura 3.13 apresenta um esquema de um sistema típico, simplificado, de espectrometria gama.

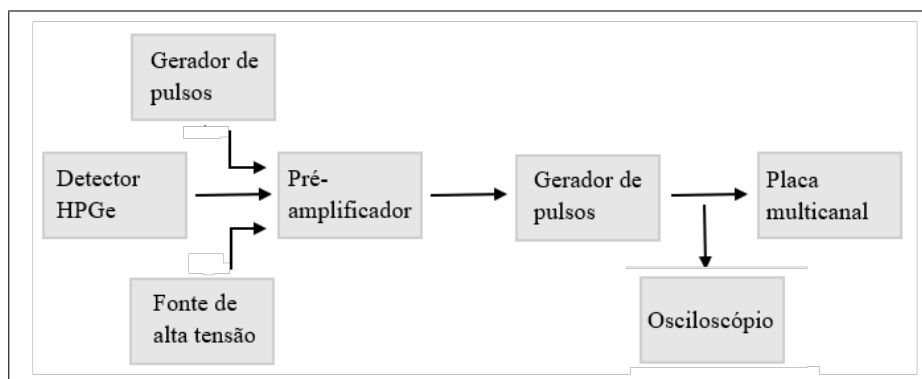


Figura 3.13: Esquema de um sistema típico de espectrometria gama.

Fonte: Modificado de FERREIRA [131].

A resolução em energia é considerada o parâmetro mais importante para definir a função resposta do detector. Considerando que a altura dos pulsos tende a uma distribuição normal em torno de um valor médio, a resolução em energia é, por definição, calculada em relação à medida da largura do fotópico à metade da altura máxima (FWHM - Full Width at Half Maximum). Essa definição pressupõe que qualquer radiação de fundo sobre o qual o pico possa se sobrepor é insignificante ou foi subtraído (KNOLL [81]; SANTOS JUNIOR [132]).

3.11.1 Blindagem

A espectrometria gama aplicada à análise de amostras ambientais normalmente tem um problema com a taxa de contagem no fotopico de interesse devido à radiação de fundo, que tem influência determinante na qualidade do espectro adquirido e por isso deve ser a mais baixa possível. A radiação de fundo tem origem na radiação cósmica que bombardeia a atmosfera e nas fontes naturais; em razão disso, a maioria dos detectores é provida com algum grau de blindagem externa para reduzir o nível medido. Ademais, nos laboratórios, este isolamento é importante devido à possibilidade de uso de outras fontes de radiação (FERREIRA [131]; KNOLL [81]).

O chumbo é o material mais utilizado devido à sua alta densidade ($11,34 \text{ g/cm}^3$) e ao alto número atômico ($Z=82$). O chumbo possui contaminação de elementos primordiais e alguns radionuclídeos específicos não podem ser removidos quimicamente durante o processamento do chumbo. Recomenda-se também que um material como cobre ou alumínio seja aplicado na superfície interna da blindagem de chumbo a fim de diminuir os fótons de aniquilação e os raios X característicos do Pb que resultam das interações da radiação com a blindagem de chumbo (MEDHAT; WANG [133]).

3.11.2 Criostato

Detectores de germânio devem ser resfriados para reduzir a corrente de fuga de forma a não prejudicar a excelente resolução de energia devido a ruídos. Normalmente, a temperatura é reduzida a 77K com o uso de um *dewar*, isolado termicamente, no qual um reservatório de nitrogênio líquido é mantido em contato térmico com o detector. O detector deve ser alojado em um criostato hermético para inibir a condutividade térmica entre o cristal e o ar circundante (KNOLL [81]).

O cristal de germânio é mantido num suporte geralmente feito de alumínio e está em contato térmico com uma haste de metal chamada “dedo frio”, que transfere o calor do conjunto do detector para o reservatório de nitrogênio líquido.

Os sistemas de resfriamento criostático oferecem os seguintes recursos:

- Resfriamento do detector para obtenção de temperaturas estáveis.
- Vácuo para isolamento térmico e proteção de contaminantes na superfície do detector.
- Supressão da transferência de calor entre as partes internas frias e as externas quentes.
- Montagem para os contatos elétricos e isolamento contra vibrações externas (WALLBRINK; WALLING; HE [134]).

3.11.3 Calibração em energia

A calibração em energia consiste na determinação de uma relação entre as energias dos raios gama detectados e as respectivas posições dos picos do espectro. O procedimento consiste na aquisição de espectros gama de fontes radioativas padrão cujas energias da radiação gama emitidas são conhecidas e posterior comparação com as posições dos respectivos fotopicos GILMORE [135]).

A validação do sistema de detecção é realizada com padrões certificados, sendo responsável por aferir confiabilidade ao sistema de detecção. O processo de validação consiste na medição de um padrão, cuja atividade é conhecida (SILVA [136]).

3.11.4 Programa Genie 2000

O Genie 2000 da Canberra [137] é um dos pacotes mais comumente utilizados em espectrometria gama. O programa fornece uma plataforma para aquisição de dados de detectores gama e analisa os espectros obtidos com algoritmos avançados. A ferramenta consiste num conjunto de recursos para aquisição e análise de espectros de analisadores multicanal (MCAs). Suas funções incluem controle de MCA, exibição e manipulação espectral, análise espectral básica e geração de relatórios. (CANBERRA INDUSTRIES [137]).

3.11.5 Composição de geometrias

O LabSOCS é um software de calibração de eficiência matemática que contém modelos de geometria de recipientes comuns disponíveis comercialmente. Cada modelo do LabSOCS permite uma grande variedade de parâmetros que podem ser especificados conforme necessário. A saída final do LabSOCS é uma curva de calibração de eficiência que é armazenada diretamente entre os arquivos de calibração do software de análise de espectro, podendo ser usada da mesma forma que as curvas geradas por meio de técnicas de calibração tradicionais.

3.11.6 Limite Mínimo de Detecção (LMD)

A determinação do Limite Mínimo de Detecção (LMD) do sistema é um aspecto importante na espectrometria gama. Este parâmetro serve para definir o procedimento em relação aos valores obtidos, ou seja, a partir de determinado valor, define-se qual área corresponderá a uma atividade (CARDOSO [63]).

Existem algumas maneiras de calcular o LMD, sendo o método Curie o geralmente mais utilizado. Alguns parâmetros são necessários para a definição do LMD.

- a) **Limite crítico (Lc)**: estabelece-se a área para fazer a medida, indicando se ela é estatisticamente significativa ou se representa apenas uma flutuação da radiação de fundo.
- b) **Nível de confiança (k)**: é a probabilidade de que um parâmetro estimado se encontre dentro de um intervalo de confiança. Por exemplo, $k = 1,645$ para um nível de confiança de 90% e $k = 1,96$ para 95%.
- c) σ_0 : desvio padrão.

4

Materiais e Métodos

Esta seção destina-se a descrição dos procedimentos adotados para alcançar os objetivos propostos, desde a obtenção da autorização do INEA para pesquisa, passando pelo contato com a Agroprata e agricultores até a apresentação dos materiais selecionados para análise e sua obtenção, o preparo e armazenamento das amostras, as características do detector empregado nas medições da radiação gama, a calibração do sistema, a geração das curvas de eficiência e a aquisição dos dados.

A escolha da localidade baseia-se no aumento tanto do consumo de alimentos orgânicos quanto do turismo ecológico. O PEPB, mesmo sendo uma unidade de conservação, abriga comunidades de agricultores familiares que cultivam em sítios pertencentes à enorme área. Devido à extensão e por questões de acesso, um desses sítios foi selecionado para coleta de vegetais e solos.

4.1 Autorização do INEA

A primeira etapa foi a obtenção da autorização do Instituto Estadual do Meio Ambiente INEA para realização desta pesquisa, pois de acordo com este instituto, atividades desta natureza em Unidades de Conservação, necessitam de autorização prévia, que foi concedida sob o nº. 27/2021.

4.2 Contato com a Agroprata

Um contato com os responsáveis pela Associação dos Agricultores Orgânicos da Pedra Branca – Agroprata foi realizado com o objetivo de informar sobre a pesquisa a ser desenvolvida.

Foi aplicado um questionário aos produtores/vendedores dos alimentos orgânicos com perguntas a respeito dos sítios onde são cultivados, sazonalidade dos produtos, se adquirem orgânicos de outras localidades e permissão para coleta de solo. Três

peessoas participaram da pesquisa que foi feita na própria feira e por conta da agitação da atividade local, não foi possível fazer as perguntas na sequência que apresenta o questionário, Apêndice 6.1, com o objetivo de se obter uma previsão das frutas, legumes e hortaliças que seriam comprados.

4.3 Obtenção das amostras

As amostras analisadas neste trabalho consistem em vegetais orgânicos adquiridos, na feira de orgânicos, de diferentes produtores, integrantes da Agropрата. A análise foi dividida em três etapas, nas duas primeiras os vegetais foram adquiridos nas Feiras de Orgânicos do Rio da Prata – sub-bairro de Campo Grande/RJ e do Bairro do Recreio dos Bandeirantes. A Figura 4.1 mostra os ambientes das feiras mencionadas, com as placas indicando a certificação orgânica. As imagens das placas foram alteradas a fim de preservar a privacidade das pessoas envolvidas. Na terceira etapa deste estudo, as amostras de vegetais e de solo foram coletadas do sítio de um único produtor. Todos os materiais analisados têm origem no PEPB.

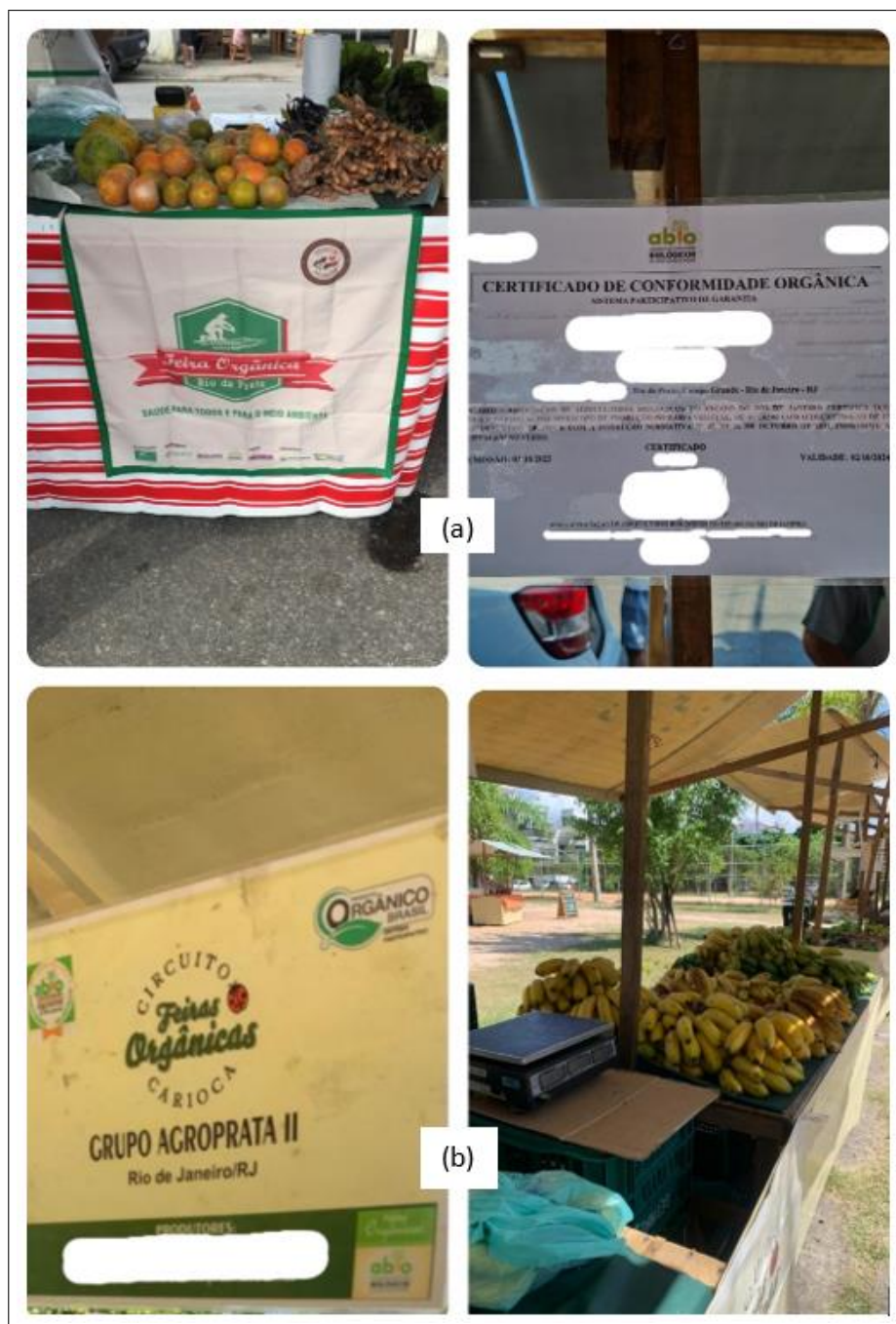


Figura 4.1: (a)Feira de orgânicos de Campo Grande; (b)Feira de orgânicos do Recreio.

Fonte: Arquivo pessoal.

4.4 Preparo das amostras

A aquisição e preparo das amostras divide-se em três etapas:

- a) Etapa 1 – Amostras de vegetais *in natura* congeladas;
- b) Etapa 2 – Amostras de vegetais desumidificados;

- c) Etapa 3 – Amostras de vegetais e de solos para estimar o fator de transferência de radionuclídeos solo-planta.

4.4.1 Amostras de vegetais– Etapa 1

Na primeira etapa da pesquisa, foram realizadas análises com alimentos in natura com a finalidade de representar as condições naturais de consumo e também de refletir as variações locais que influenciam a quantidade de radionuclídeos nos alimentos.

Os alimentos foram postos separadamente em sacolas limpas e transportados para o Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional do Programa de Engenharia Nuclear na Universidade Federal do Rio de Janeiro (LAASC/PEN/UFRJ) onde passaram por um processo de limpeza para retirada de vestígios de terra, insetos e outras impurezas externas, com a utilização de apenas água desmineralizada. Após a lavagem, a água foi retirada com um tecido de algodão. As partes comestíveis foram separadas e de acordo com as características de cada alimento foram trituradas com auxílio de um mixer, um liquidificador ou tiveram seu sumo coletados com auxílio de um espremedor, com a finalidade de obtenção de amostras homogêneas. A Figura 4.2 mostra alguns equipamentos utilizados na homogeneização dos alimentos.



Figura 4.2: (a) Liquidificador. (b) Espremedor de frutas.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Todas as amostras foram depositadas em recipientes de polipropileno de mesmo

volume que foram selados com cola termoplástica e envolvidos em filme de PVC. As massas foram medidas em uma balança da marca Gehaka, modelo BG 4000 com resolução de $\pm 0,01$ g, como exibida na Figura 4.3.



Figura 4.3: Balança de precisão Gehaka modelo BG 4000.

Fonte: Elaboração própria.

Após a verificação da massa os recipientes foram identificados, como mostra a Figura 4.4 e armazenados em um freezer a uma temperatura de -18°C , por um período de pelo menos 45 dias para alcançar o equilíbrio secular. O ^{222}Rn , descendente do ^{226}Ra (gasoso), pode escapar facilmente da amostra impedindo a formação do ^{214}Pb e do ^{214}Bi dentro da amostra. Para que haja equilíbrio entre estes radionuclídeos com o ^{226}Ra são necessários de 5 a 7 meias-vidas do ^{222}Rn (3,82 dias), aproximadamente 30 dias. Na literatura científica pode haver questionamento a respeito do tempo de 30 dias, considerado curto para se estabelecer o equilíbrio. Desta forma o tempo de 45 dias tem sido utilizado em artigos mais recentes e pode ser adotado por segurança analítica (LEWICKA ET AL.) [138].



Figura 4.4: Amostras de alimentos prontos para armazenamento.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

O fato dos alimentos estarem *in natura* não compromete a análise uma vez que a correção devida à ocorrência de autoabsorção dos fótons na própria amostra é efetuada pelo programa LabSOCS durante a simulação das curvas de eficiência GARCEZ [139]. Além disso, em caso de incidentes, recomenda-se analisar alimentos frescos, pois o teor de umidade pode chegar a 95%, o que implica eficiências semelhantes às da água, com desvios inferiores a 1% para todas as energias (KAMINSKI [140]).

Aba *et al.* [141] ponderam a recomendação da IAEA a respeito do fator de transferência ser expresso em peso seco, alegando que pesos úmidos são normalmente utilizados para estimar a dose efetiva comprometida através da ingestão de gêneros alimentícios contaminados.

Guillén [142] afirma que na literatura também se encontram factores de transferência expressos em massa fresca, especialmente utilizados em caso de consumo direto, como é o caso das frutas.

4.4.2 Amostras de vegetais - Etapa 2

Na segunda etapa deste estudo, as amostras de vegetais, também adquiridas na feira de orgânicos, foram desumidificadas em forno de micro-ondas, da marca Electrolux (modelo MEO44, 34 L, tensão 100V-120V, potência 1300W). O limite da secagem foi a estabilização da massa: a partir do momento em que a massa não sofria mais variação, o processo era interrompido. Durante o processo de secagem, foi utilizado papel toalha para retirar o excesso de água das paredes do forno. O tempo de secagem foi inferior a 4 horas para todas as amostras que passaram por este processo. Com auxílio dos equipamentos processador e um mixer de alimentos, as amostras sólidas foram trituradas, peneiradas, armazenadas em potes de acrílico e tiveram suas massas aferidas em balança de precisão.

As amostras foram dispostas em recipientes de vidro próprios para forno de micro-ondas. A secagem foi realizada com: vários ciclos na faixa de 15 a 20 minutos a potência de 50% a 70%, a depender da estrutura do vegetal, com intervalos para evitar sobrecarga do forno.

A Figura 4.5 mostra um alimento numa das etapas do processo de homogeneização das amostras.



Figura 4.5: Alimento em etapa de homogeneização.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Alimentos como laranja e limão tiveram seu sumo extraído e também passaram pela redução do teor de água no microondas até estabilização da massa e como descrito anteriormente foram armazenadas em potes de acrílico lacrados com cola termoplástica, envolvidos em filmes de PVC e armazenados por 45 dias a temperatura ambiente. Esta etapa de secagem das amostras foi realizada no laboratório de Biologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro-Campus Zona Oeste (UERJ-ZO). Na Figura 4.6 estão algumas amostras secas prontas para análise.

Geralmente a secagem dos alimentos é realizada em estufa Cruz [136]; Hassan [67]; Oladele [143]; Eliud [144]; Raj *et al.* [145]. Neste trabalho optou-se pela redução do teor de umidade com uso de micro-ondas doméstico.

O teor de água, quantidade de água presente num alimento, é uma medida analítica importante no processamento e teste de produtos alimentícios, tendo importância direta na uniformidade de resultados, geralmente é expressa em porcentagem do peso total (CUNHA [146]).



Figura 4.6: Alimentos secos prontos para análise.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Pastorini *et al.* [147] selecionaram entre outras partes folhas de feijão e milho, após 30 dias de semeadura em água, selecionaram entre outras partes folhas de feijão e milho, após 30 dias de semeadura em água e realizaram secagem em estufa por circulação forçada e por forno de micro-ondas. Além de terem como objetivo a análise química das amostras, os autores avaliaram o uso do forno de micro-ondas como alternativa mais rápida para obtenção da matéria seca e obtiveram como resultado uma secagem mais rápida.. Na comparação entre os métodos de secagem por circulação forçada e por forno de micro-ondas, este último utilizado neste trabalho, Pastorini *et al.* [147] verificaram que não houve diferenças significativas entre a matéria seca de plantas de milho e feijão.

Souza *et al.* [148], indicam que diversos trabalhos já foram descritos na literatura comparando a secagem por radiação de micro-ondas com a realizada em estufa com circulação forçada de ar, em amostras variadas, como tomate, queijo, carnes, milho e forragem. Os autores concluíram, em estudo realizado com secagem de solo, gramíneas e silagem em micro-ondas doméstico, que o procedimento proposto se apresenta como uma alternativa ao método convencional (estufa) de secagem, sendo que as principais vantagens são a redução no consumo de energia e a significativa redução no tempo de secagem quando se deseja secar, respectivamente, solo ou planta, no procedimento assistido por micro-ondas.

Protocolos da IAEA [65], TECDOC-1360, há recomendação de que a secagem de solos e plantas prossiga até peso constante, determinado por duas pesagens consecutivas com variação inferior a 0,01 g. Essa mesma norma destaca que, independentemente do método (estufa, micro-ondas ou radiação infravermelha), o fim do processo deve ser a estabilidade da massa, pois é esse ponto que assegura a remoção completa da umidade livre sem decompor compostos minerais ou orgânicos relevantes para a análise radiológica.

Em Ribeiro [62], amostras de cenouras de cultivo orgânico e convencional foram analisadas por espectrometria gama. As amostras foram secas em estufa a 80 °C por

24 horas para determinação da massa seca. O autor encontrou valores para a razão massa seca/massa úmida que variaram de 0,019 a 0,1205. No presente trabalho o valor obtido para as amostras de cenoura, que tiveram umidade retirada com a utilização do forno de micro-ondas, foi de 0,103 (etapa 2) e 0,097 (etapa 3). Estes resultados indicam a viabilidade do uso do micro-ondas para retirada de umidade, apresentando valores comparáveis aos encontrados para secagem na estufa.

4.4.3 Amostras de vegetal e solo – Etapa 3

Para calcular o fator de transferência de radionuclídeos solo-planta, amostras de vegetais e solo foram coletadas, *in situ*, em um sítio administrado pelo produtor 3. A Figura 4.7 mostra trechos da trilha, no PEPB, que dão acesso às áreas de coleta.

A trilha realizada para acessar o local da coleta dos solos teve como ponto de partida a guarita do INEA, na Estrada do Batalha. O sítio com as plantações de orgânicos tem terrenos nas coordenadas 22°56'00.2"S 43°30'06.3"W e 22°56'03.7"S 43°30'01.1"W, que foram obtidas a partir de fotos retiradas com o celular com serviço de localização ativado e com a utilização do Google Maps foi possível identificar o local a partir de uma imagem gerada por satélite. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam estas imagens.

De acordo com a International Union of Radioecology (IUR) como a profundidade da camada de solo a ser considerada para o cálculo é de extrema importância para os radionuclídeos depositados no solo e com distribuição não homogênea em profundidade, para reduzir a influência desta variável recomenda-se uma localização padronizada para as raízes no solo, assumindo que todos os radionuclídeos presentes na zona de enraizamento encontram-se entre 0-10 cm para a relva e de 0-20 cm para todas as outras culturas, incluindo árvores (GUILLÉN [142]).

Para análise estatística parte-se do princípio de que os radionuclídeos estão homogeneamente misturados numa camada que vai desde a superfície até determinada profundidade, considerando então 20 cm para todas as culturas exceto para relva onde se utiliza 10 cm. (FRISSEL [124]).

Para esta etapa do trabalho foram coletados vegetal e solo da correspondente área de plantio. As amostras de vegetal foram preparadas como descrito na seção 4.5.2. Como no local, as culturas são feitas basicamente em canteiros de pequenas áreas e próximas umas das outras, como mostra a Figura 4.10, a fim de não prejudicar a produção familiar, foram escolhidos 3 pontos de cada plantação do vegetal selecionado e foram retiradas amostras de solo com a profundidade de 20 cm, Aloudat *et al.* [149] somando aproximadamente 1kg, para o preparo de uma amostra representativa.

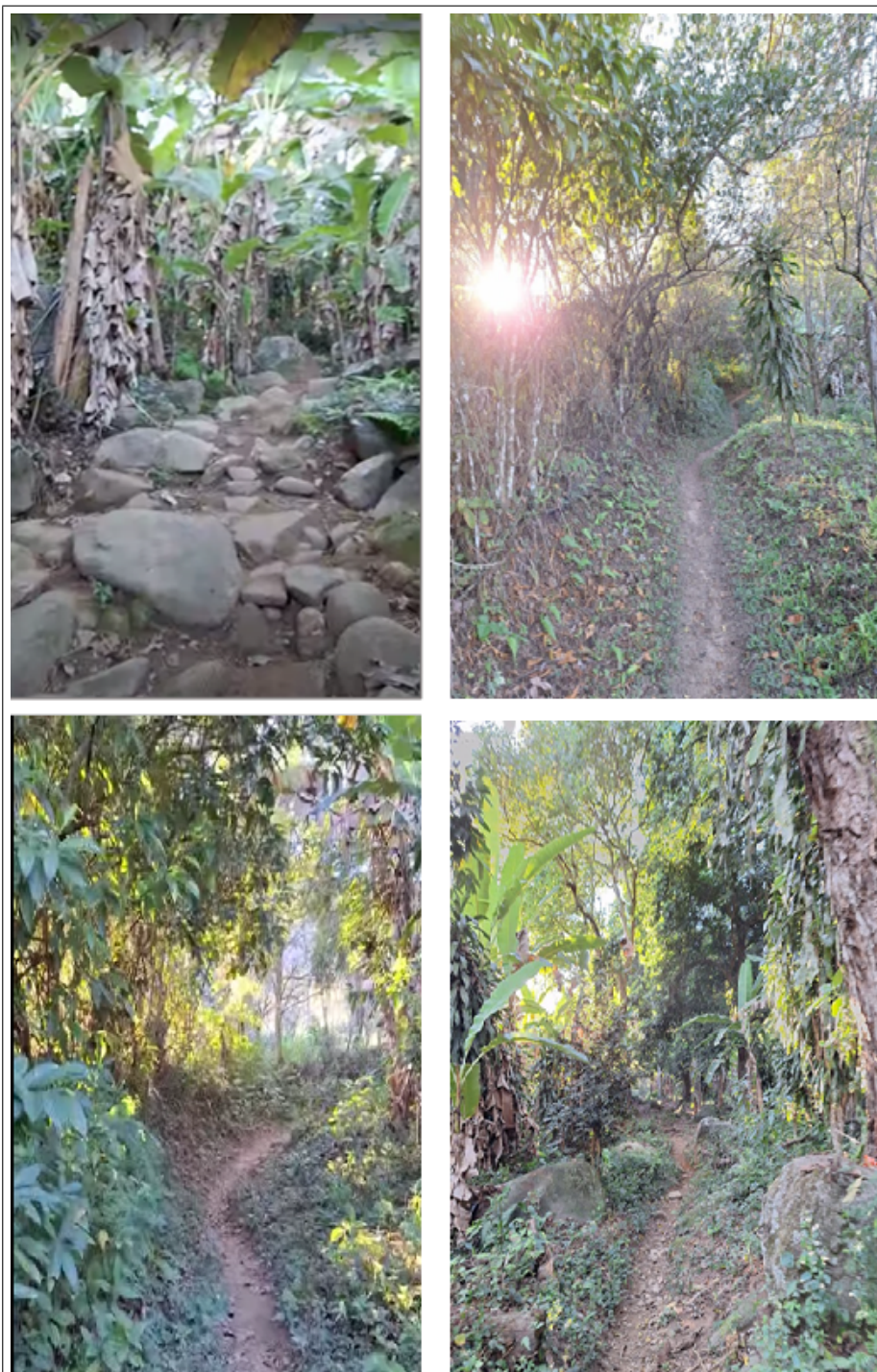


Figura 4.7: Trechos da trilha de acesso à área de estudo, PEPB.

Fonte: Arquivo pessoal.

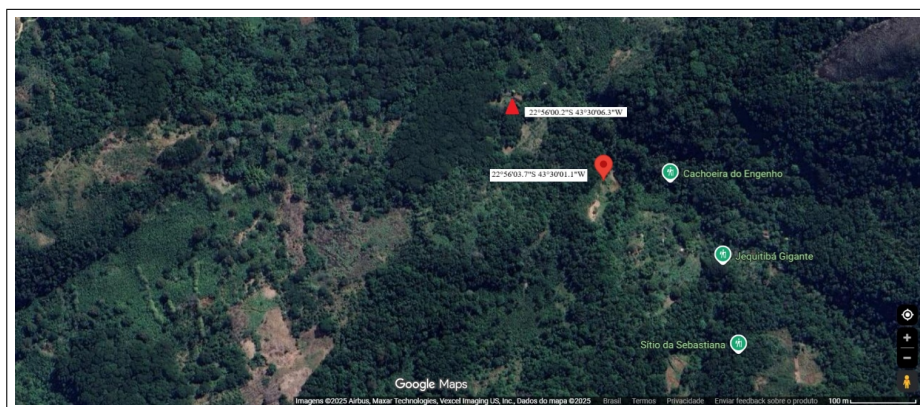


Figura 4.8: Imagem gerada por satélite: identificação de dois terrenos do sítio.
 Fonte: Elaboração própria, 2025.



Figura 4.9: Imagem gerada por satélite: identificação do início da trilha e um dos terrenos

Fonte: Elaboração própria, 2025.



Figura 4.10: Plantação de alface (a); Mamoeiro (b).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Para coleta do solo foi utilizado um trado holandês, desmontável com haste em aço carbono, ponteira em inox e uma pá de jardinagem para auxílio na retirada de excessos. O material foi colocado num balde. Todos os instrumentos utilizados foram devidamente limpos a cada mudança de canteiro para evitar contaminação. As amostras foram transportadas em sacolas de plástico limpas e levadas para o Laboratório de Modelos Reduzidos (LMR) na UERJ-ZO onde passaram por uma primeira peneiragem para retirada de eventuais raízes, folhas, grãos maiores e depositadas em marinex, que na sequência foi colocada numa estufa da marca 7 Lab, modelo SSDi, 30 L e potência 550 W. A secagem ocorreu a 105 °C até atingir peso constante. As amostras foram peneiradas novamente e postas em recipientes de po-

lipopileno, com tampa de rosca. Uma vez selados com solda plástica, embalados com filme PVC e identificados, foram armazenados até o momento da análise, após o período do equilíbrio secular. A Figura 4.11 apresenta etapas da coleta, preparação e armazenamento dos solos.



Figura 4.11: Alimentos secos prontos para análise.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.5 Espectrometria gama

A avaliação das concentrações de atividade de radionuclídeos de sistemas bióticos e abióticos pode ser realizada por diversas técnicas e as mais utilizadas são: espectrometria alfa, cintilação líquida, espectrometria de massa e análise por ativação neutrônica. Entretanto, são técnicas que demandam métodos radioquímicos convencionais que envolvem custos elevados e podem ser trabalhosos. A espectrometria gama é uma alternativa para análise de radionuclídeos naturais, é uma técnica bastante difundida e tem como vantagens a quantidade de informações em uma única análise, é uma técnica não destrutiva, de análise rápida e multielementar (JUNIOR [132]).

A espectrometria gama é uma técnica direta de análise de radionuclídeos capaz de determinar a concentração de atividade em diferentes materiais incluindo alimentos. A técnica utiliza detectores HPGe e softwares que permitem a determinação de radionuclídeos com fotopicos de energia baixa desde a faixa dos Raios-X até alguns

MeV bem como sua identificação e quantificação. Figuram como vantagens do uso da técnica o tempo de resolução (aproximadamente 10^{-8} s) e a sua linearidade de resposta em uma ampla faixa de energia. (ROSA ET AL. [150]).

4.6 Detector HPGe

Os espectros de emissão gama são comumente obtidos por detectores de germânio hiperpuro HPGe. A principal característica deste detector é baseada na sua alta resolução na determinação da energia da radiação gama, possibilitando menor incerteza na medida (JÚNIOR [132]).

Os espectros foram obtidos com o uso de um detector de germânio hiperpuro vertical, da Canberra, modelo GC3020, com eficiência relativa de 30% e resolução em energia de 1816 keV para o pico de 1332,5 keV do 60-Co. O cristal de germânio hiperpuro possui dimensões iguais a 62 mm de diâmetro e altura de 40 mm. Este sistema de aquisição de dados também conta com uma blindagem, marca Camberra modelo 747 E, de chumbo de baixa radiação de fundo, com espessura de 10,16 cm, revestida internamente por 1 mm de estanho recoberto com 1,6 mm de cobre. Esta parte interna possui uma cavidade com 27,9 cm de diâmetro e 27,5 cm de profundidade. Externamente, a blindagem possui revestimento de 9,5 mm de aço com baixa porcentagem de carbono. Um pré-amplificador do tipo RC, modelo 2002 C, acoplado ao detector no criostato, modelo 7500 SL e dewar com capacidade para 30 L. A Figura 4.12 mostra o sistema de aquisição de dados (espectrômetro de alta resolução composto por detector HPGe e demais dispositivos) instalado no LAASC/PEN/UFRJ.

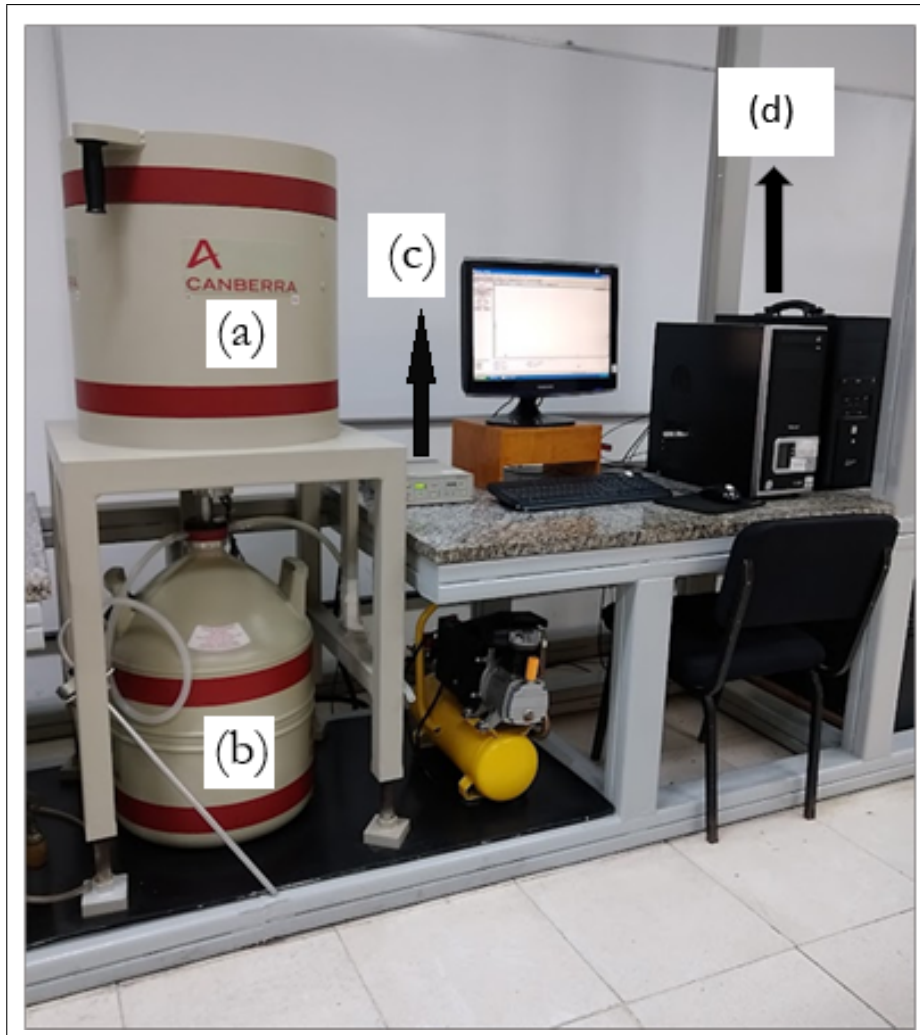


Figura 4.12: Sistema de aquisição de dados: (a) blindagem do detector; (b) dewar; (c) multicanal DAS 1000; (d) microcomputador.

Fonte: Elaboração própria.

4.7 Calibração em energia

A finalidade da calibração em energia é relacionar a energia dos raios gama detectados com a posição do pico no espectro. O processo envolve a medição do espectro de uma fonte radioativa emissora de raios gama em energias conhecidas, informação dos picos a serem medidos e fornecimento das energias precisas dos picos selecionados. Assim, o sistema pode procurar os picos necessários, encontrar seus centróides e ajustar uma função apropriada aos pares de dados de posição/energia (Gilmore [135]). O analisador multicanal consegue distinguir e classificar as energias de forma linear, sendo possível associar um canal a uma determinada energia, identificando assim o radionuclídeo (SILVA [136]).

A calibração em energia do sistema de detecção foi feita com fontes que possuem emissão gama coincidentes ou próximas das áreas de interesse no espectro.

Os padrões certificados utilizados foram ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na e ^{40}K , totalizando 5 pontos experimentais de energia 661,6 keV, 1173 keV, 1332,5 keV, 1274 keV e 1460 keV. A única fonte certificada que coincide com a energia de emissão estudada, é ^{40}K , as demais energias são determinadas a partir do ajuste da curva de calibração.

O software Genie 2000 foi utilizado para detecção e determinação das curvas de calibração. A calibração pode ser feita com fotopicos no espectro inteiro, de 0 a 2000 keV, ou na área de interesse, na faixa de energia investigada, a segunda opção resulta em redução de desvio de fotopico em relação à energia real de emissão gama do nuclídeo, aumentando a precisão para determinação de contaminação, se necessário. O sistema multicanal utilizado foi o DSA (Digital Spectrum Analyzer) com tecnologia DSP (Digital Signal Processor) de 8192 canais, a tensão aplicada para criar a área de depleção foi de 4500 V.

4.8 Curvas de eficiência

Normalmente utiliza-se como padrão uma fonte radioativa, com atividade conhecida que permite a obtenção da eficiência para amostras com geometria e características idênticas. Aplicar a metodologia descrita em amostras de alimentos torna-se complexa uma vez que seria necessário um padrão para cada alimento e geometria selecionados (Mireles *et al.* [151]). Por esse motivo optou-se pela simulação das eficiências de acordo com as energias dos fótons.

O programa computacional LabSOCS em conjunto com o Genie 2000, foi empregado para simular os valores das eficiências de acordo com a energia, bem como nas correções devido à autoatenuação. Os valores das energias foram selecionados previamente, com intensidades em keV de: 45, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000, 1400 e 2000. A geometria foi reproduzida no software LabSOCS, com a inserção das características das amostras e dos porta-amostras.

Para cada uma das amostras foi gerada uma geometria em ambiente virtual devido à diferença de densidade e para cada uma delas foi obtida uma curva de eficiência. A Figura 4.13 mostra uma típica curva de eficiência gerada pelo software LabSOCS.

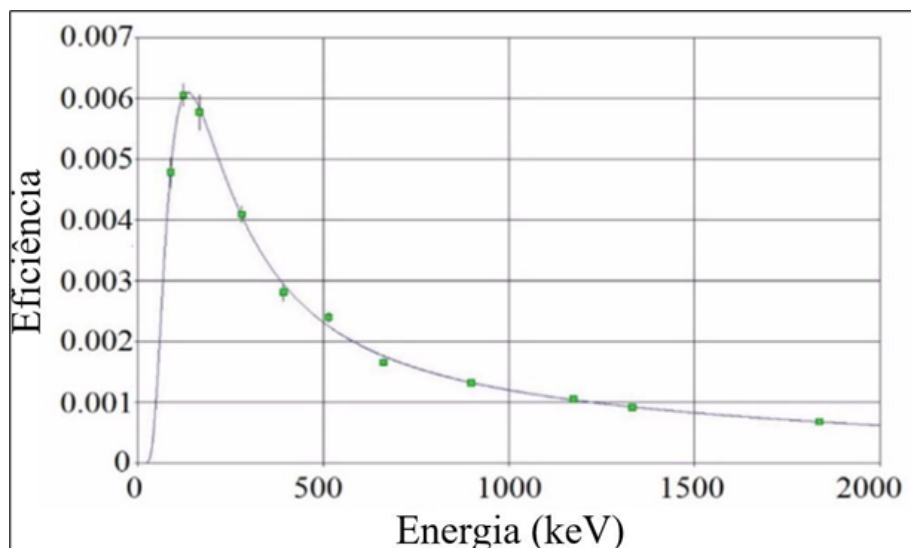


Figura 4.13: Curva típica gerada pelo LabSOCS.

Fonte: Elaboração própria.

As características das amostras, do porta-amostras, do absorvedor e da distância fonte-detector, necessárias para o cálculo das eficiências, foram inseridas em uma caixa de diálogo do *software* indicada na Figura 4.14.

Edit dimensions - Simplified Beaker

Description: BANANA FIGO ORG01

Comment:

Units: ☒ mm ☐ cm ☐ m ☐ in ☐ ft

Specify sample by its: ☒ Dimensions ☐ Volume ☐ Weight

No.	Description	d.1	d.2	d.3	d.4	Material	Density	Volume, ml
1	Beaker	0.4	53.1	62.4	49.0	polyprop	0.91	
2	Sample	46.0				(New...)	0.86	
3	Absorber 1	3.0				polystyr	1.06	
4	Absorber 2	0				(none)	0	
5	Source - Detector	3.0						

Buttons: OK, Cancel, Apply, Help, View Drawing...

Figura 4.14: Caixa de diálogo do software LabSOCS.

Fonte: Elaboração própria.

A Figuras 4.15 ilustra uma tela do ambiente virtual onde a geometria é simulada pelo programa LabSOCS.

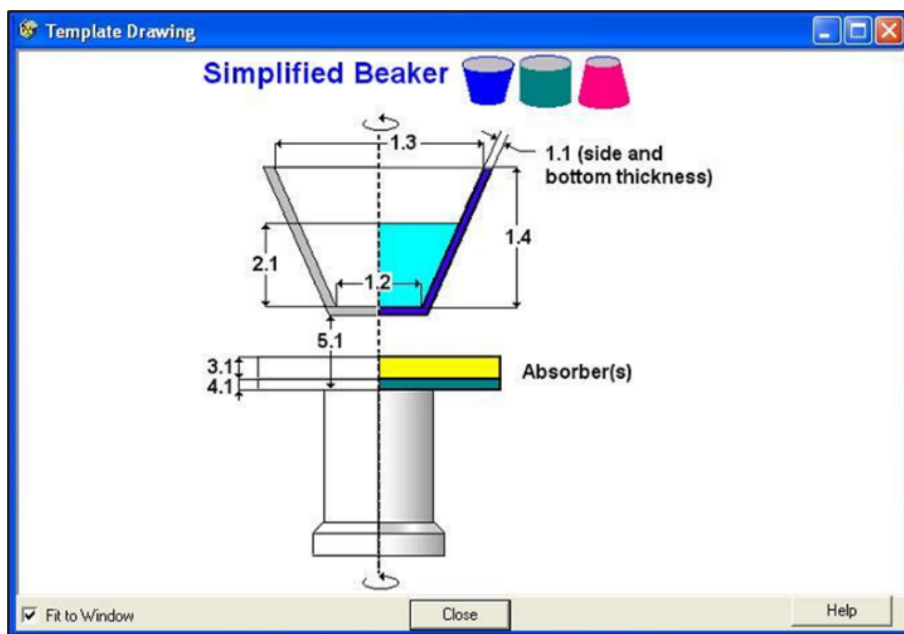


Figura 4.15: Tela de simulação de geometria no LabSOCS.

Fonte: Elaboração própria, 2022.

A partir das informações inseridas na caixa de diálogo a modelagem da geometria é exibida na tela como mostra a Figura 4.16.

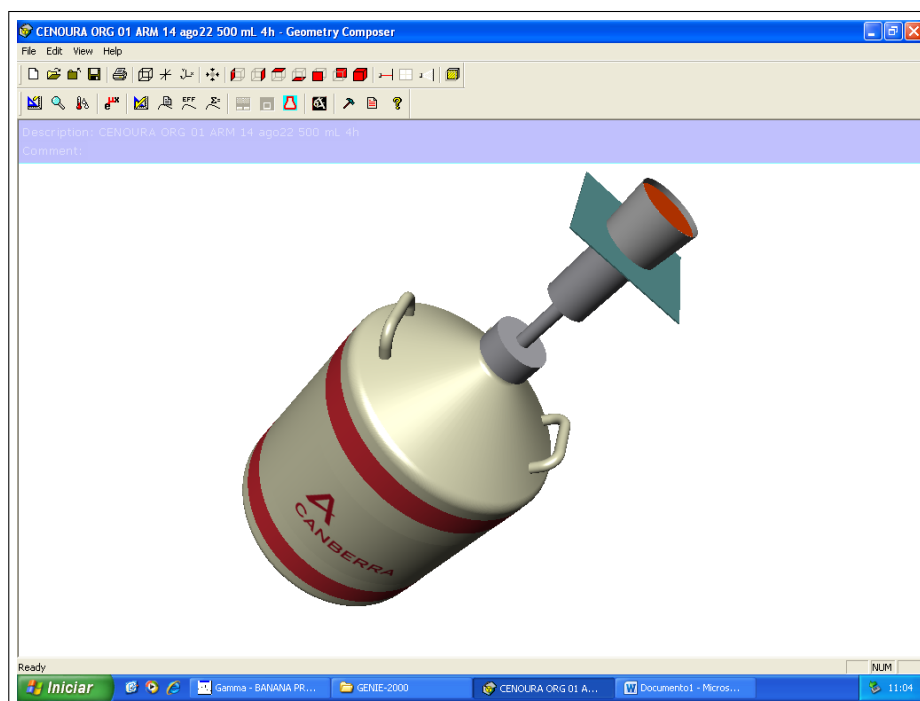


Figura 4.16: Geometria modelada.

Fonte: Elaboração própria, 2022.

4.9 Validação do sistema de detecção

A validação do sistema de detecção é realizada a partir da comparação das eficiências obtidas experimentalmente com as eficiências obtidas por simulação no LabSOCS (LOPES [152]).

A fim de garantir a confiabilidade dos resultados na análise por espectrometria gama, um parâmetro fundamental é um arranjo experimental que permita validar os resultados experimentais com a utilização de padrões certificados. Outros parâmetros necessários na aplicação desta técnica são: a eficiência de contagem do fóton, boa calibração do sistema de medidas, baixo limite de detecção, padronização das massas das amostras, tempo de aquisição, minimização da autoabsorção com uso de padrões com densidades semelhantes às amostras analisadas (SILVA [153]).

Em estudo realizado por Dos Santos *et al.* [154] para a determinação das curvas de eficiência para análise de radionuclídeos em frutas orgânicas por espectrometria gama, a validação dos resultados foi realizada com base na comparação entre a atividade obtidas a partir das simulações das eficiências no LabSOCS e a atividade de uma fonte pontual de ^{137}Cs , certificada e cedida ao Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional (LAASC) pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). Com os valores das eficiências simuladas juntamente com contagens no detector HPGe, a atividade da fonte pontual foi calculada. Para o cálculo da atividade foi utilizada a Equação 4.1 (IAEA [65]).

$$A = \frac{N \cdot L}{\varepsilon \cdot t \cdot P_{\gamma}} \quad (4.1)$$

Onde:

A = atividade do radionuclídeo (Bq).

NL = taxa líquida de contagens para a energia do raio gama (γ) do radionuclídeo, em contagens por segundo (cps).

ε = eficiência de detecção do sistema na energia de interesse.

P_{γ} = probabilidade absoluta de transição do raio gama (γ) medido.

t = tempo de contagem (s).

A Tabela 4.1 mostra os valores da contagem, eficiência simulada, energia, tempo de contagem e tempo morto, sendo os dois primeiros dados utilizados para os cálculos da atividade da fonte de ^{137}Cs .

Tabela 4.1: Dados para o cálculo da atividade do ^{137}Cs com eficiência simulada.

Fonte	Contagem no HPGe	Eficiência simulada	Energia (keV)	Tempo de contagem (s)	Tempo morto (%)
^{137}Cs	189887	4,03E-03	662	1800	0,73

Fonte: Elaboração própria, 2022.

A Tabela 4.2 apresenta os valores das atividades da fonte de ^{137}Cs quando foram cedidas pelo IRD ao LAASC, no dia da contagem no HPGe e calculados pela eficiência simulada.

Tabela 4.2: Atividades medidas e calculadas para o ^{137}Cs

Fonte Certificada IRD	Atividade (Bq) em 22/06/2016	Atividade (Bq) em 25/10/2022	Atividade calculada (Bq)	Variação percentual
^{137}Cs	40237	34764	34215	1,58

Fonte: Elaborada pelo autor.

A atividade do ^{137}Cs calculada com a utilização do valor da eficiência obtida pela simulação no programa LabSOCS apresentou uma diferença pouco significativa, menor do que 2%, com relação à atividade medida no dia da contagem, validando assim as eficiências de detecção simuladas no software obtidas para as amostras analisadas naquele estudo.

No presente trabalho, para validar o sistema de detecção, foi realizada uma comparação entre os espectros de radiação gama do material de referência gerados pelo sistema de espectrometria gama do LAASC e pelo Laboratório de Espectrometria Gama (LGI)/IRD/CNEN. O LGI é rastreável pelo LNMRI (Laboratório Nacional de Metrologia de Radiações Ionizantes/IRD/CNEN), que de igual modo é rastreado pelo Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). O LGI tem demonstrado bom desempenho em exercícios de intercomparação, como os organizados pelo programa MAPEP (Programa de Avaliação de Desempenho de Análise Mista do Laboratório de Ciências Radiológicas e Ambientais) do USDOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos), (GARCEZ [155]).

4.10 Concentração de atividade

A concentração atividade específica de um radionuclídeo pode ser calculada de acordo com a Equação 4.2 LOPES [152].

$$CA = \frac{N_L}{\varepsilon \cdot P_\gamma \cdot t \cdot m} \quad (4.2)$$

Onde:

CA = concentração de atividade do radionuclídeo ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)

N_L = taxa líquida de contagens para a energia do raio gama do radionuclídeo, em contagens por segundo (cps)

ε = eficiência de detecção do sistema na energia de interesse

P_γ = probabilidade absoluta de transição do raio gama medido

t = tempo de contagem (s)

m = massa da amostra (kg)

O tempo de contagem utilizada neste trabalho foi de 28800s.

As emissões rastreadas no presente estudo são dos nuclídeos ^{212}Pb , ^{214}Bi , ^{228}Ac , ^{40}K , com emissão gama nas energias 238,6 keV, 609 keV, 911 keV e 1460 keV respectivamente. A Tabela 4.3 mostra os radionuclídeos de interesse da pesquisa, as linhas de energia gama para determinar a concentração de atividade dos radionuclídeos ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K e as correspondentes probabilidades de emissão.

Tabela 4.3: Isótopos de transição e probabilidade de emissão

Radionuclídeo	Isótopo de transição	Energia (keV)	P_γ (%)
^{228}Th	^{212}Pb	238,6	43,6
^{226}Ra	^{214}Bi	609	45,5
^{228}Ra	^{228}Ac	911,1	25,8
^{40}K	—	1460	10,66

Fonte: Modificada de BÉ & CHECHEV [156].

4.11 Incerteza da atividade

As incertezas foram calculadas com informações do BIPM. A Equação 4.3 para o cálculo é a seguinte:

$$\delta CA^2 = \left(\frac{1}{\varepsilon \cdot P_\gamma \cdot m \cdot t} \right)^2 \cdot \delta N_L^2 + \left(\frac{N_L}{\varepsilon^2 \cdot P_\gamma \cdot m \cdot t} \right)^2 \cdot \delta \varepsilon^2 + \left(\frac{N_L}{\varepsilon \cdot P_\gamma^2 \cdot m \cdot t} \right)^2 \cdot \delta P_\gamma^2 \quad (4.3)$$

Onde δCA é a incerteza da atividade específica, δN_L a incerteza da área líquida fornecida pelo Genie 2k, $\delta \varepsilon$ a incerteza associada à eficiência de detecção fornecida pelo LabSOCS e δP_γ a incerteza da probabilidade de emissão do fóton de interesse de acordo com os dados apresentados em Bé & Chechev [156].

4.12 Atividade mínima detectável

Para medidas de baixo nível de radiação é necessário definir um limite mínimo de detecção para cada energia da radiação gama. O cálculo da atividade mínima detectável Atividade Mínima Detectável (AMD) por unidade de massa da amostra, para um dado radionuclídeo, com um nível de 95% de confiança, é usualmente baseado na derivação de Currie, e está de acordo com as normas ISO 11929 (ISO 11929 [157]) e (ISO 10703 [158]). A Equação 4.4 utilizada para o cálculo do AMD:

$$\text{AMD (Bq} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{2,71 + 4,66 \cdot \sigma}{P_\gamma \cdot t \cdot m \cdot \varepsilon} \quad (4.4)$$

Onde σ é o desvio padrão do background da blindagem mais o porta-amostra medido por um tempo t , que é o tempo de aquisição do espectro, m é a massa da amostra, P_γ é a probabilidade de decaimento para certa energia, e ε é a eficiência de detecção para esta energia. Neste trabalho, para cada amostra de alimento foi efetuado o cálculo de AMD.

4.13 Dose efetiva comprometida

A dose efetiva anual de radionuclídeos nos alimentos foi calculada através da Equação 4.5.

$$\text{Def} = D_f \cdot U \cdot C_d \cdot d \quad (4.5)$$

Onde:

Def = dose efetiva anual ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$)

D_f = coeficiente de dose publicado pela ICRP 119 ($\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$)

U = quantidade de alimento consumido em um ano (kg)

C_d = concentração específica do radionuclídeo no alimento ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)

d = razão entre a massa seca e a massa úmida ($d < 1$)

Para estimar a dose efetiva comprometida foi necessário adotar valores médios de consumo alimentar anual (U , em $\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$). Esses valores foram obtidos a partir da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF 2017–2018), publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que analisa o consumo alimentar pessoal no Brasil em função da renda e da localização geográfica. O relatório não especifica nem diferencia espécies variadas como banana prata e banana figo, por exemplo. O consumo alimentar médio per capita é apresentado em gramas por dia (g/dia) para cada alimento e para categorias. Assim, para o presente trabalho os valores do consumo foram convertidos para kg/ano. Os alimentos de interesse para este estudo que constam na pesquisa do IBGE com o respectivo consumo diário são: milho (16,6 g/dia), alface (2,6 g/dia), couve (1,2 g/dia), repolho (1,3 g/dia), abóbora (2,0 g/dia), cenoura (0,9 g/dia), chuchu (1,0 g/dia), pepino (0,8 g/dia), tomate (4,2 g/dia), batata doce (6,6 g/dia), batata inglesa (10,7 g/dia) e mandioca (9,0 g/dia). Para alimentos não mencionados, o relatório indica o consumo de acordo com as seguintes categorias: “outras verduras” (3,4 g/dia), “outros legumes” (6,8 g/dia), “outros tubérculos” (2,0 g/dia) e “outras frutas” (8,8 g/dia).

A escolha de dados oficiais do IBGE assegura coerência com padrões populacionais e compatibilidade com estimativas internacionais da IAEA [88], segundo as quais mais de 90% da dose interna média anual provém da ingestão de alimentos, e menos de 10% da ingestão de água potável. Essa abordagem reforça o caráter representativo dos resultados para a dieta brasileira e para a avaliação radioecológica da exposição interna.

A incorporação de radionuclídeos via ingestão resulta em dose efetiva comprometida. A ICRP publica valores de coeficientes de conversão de vários radioelementos de atividade ingerida para dose efetiva comprometida. Considera-se para o cálculo uma única ingestão, entretanto pode ser aplicado para ingestões crônicas, para isso obtém-se a atividade incorporada de cada ano a partir do consumo de cada alimento e da atividade específica média (UMISED [159]). Os coeficientes de dose efetiva publicados pela ICRP 119 empregados para estimar a dose efetiva comprometida no presente trabalho estão indicados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Coeficientes de dose para diferentes radionuclídeos segundo a ICRP 119.

Radionuclídeos	Coeficiente de dose (nSv·Bq ⁻¹)
²²⁶ Ra	280
²²⁸ Ra	690
²²⁸ Th	72
⁴⁰ K	6,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4.5 apresenta os valores de referência de dose efetiva comprometida anual utilizados para ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²⁸Th.

Tabela 4.5: Dose efetiva comprometida (UNSCEAR [1]).

Radionuclídeos	Dose efetiva (μSv·ano ⁻¹)
²²⁶ Ra	6,3
²²⁸ Ra	11
²²⁸ Th	0,22

Fonte: UNSCEAR [1].

4.14 Estimativa do fator de transferência

O Fator de Transferência (FT) dos radionuclídeos naturais, analisados neste trabalho, foi calculado a partir dos resultados da concentração dos radionuclídeos, nos vegetais e nos solos, através da Equação 4.6:

$$FT = \frac{CA_R^P}{CA_R^S} \quad (4.6)$$

Onde CA_R^P é a concentração de atividade (Bq · kg⁻¹, peso seco) do "radionuclídeo R " na planta, e CA_R^S é a concentração de atividade (Bq · kg⁻¹, peso seco) do "radionuclídeo R " no solo (ROUT; YADAV; PULHANI [160]).

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados das concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais, ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th , encontrados em vegetais orgânicos cultivados no PEPB e em amostras de solo. Com base nesses resultados, foram estimados o FT solo-planta desses radionuclídeos e a dose efetiva comprometida devido à ingestão dos vegetais analisados. De acordo com a UNSCEAR [1], a concentração de potássio no corpo está sob equilíbrio homeostático e a dose efetiva anual para adultos devido ao ^{40}K é de $165 \mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$, independentemente da quantidade consumida. Entretanto, neste trabalho foi calculada a dose efetiva comprometida devido à presença deste radionuclídeo em alimentos orgânicos.

5.1 Amostras de vegetais – etapa 1

Na primeira etapa do trabalho, vegetais foram adquiridos de três produtores, na feira Agroprata, cujos sítios localizam-se em diferentes áreas do PEPB. A Tabela 5.1 mostra as Concentração de Atividade (CA) dos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th encontradas nas amostras textitín natura e congeladas. Ao lado de cada item, está a identificação dos produtores, para diferenciar a origem. Esta identificação foi estabelecida como produtor 1 (P1), produtor 2 (P2) e produtor 3 (P3).

Tabela 5.1: Concentração de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nas amostras *in natura*.

Amostra - Origem	Concentração de atividade ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)			
	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th
Couve - P3	$81,23 \pm 12,78$	$<0,92$	$2,84 \pm 1,19$	$0,94 \pm 0,49$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Continuação da Tabela 5.1

Amostra - Origem	Concentração de atividade (Bq.kg ⁻¹)			
	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²²⁸ Th
Chicória - P3	21,62 ± 3,41	<0,91	<1,12	<0,43
Cenoura - P3	101,83 ± 15,47	<0,86	1,31 ± 0,57	1,34 ± 0,68
Inhame - P1	117,42 ± 16,46	<0,88	1,66 ± 0,72	<0,42
Aipim - P2	47,41 ± 7,77	<0,74	<0,89	1,16 ± 0,59
Limão Siciliano - P1	27,08 ± 4,10	<0,81	<0,98	<0,39
Limão Galego - P1	96,21 ± 13,52	<0,88	1,38 ± 0,60	0,76 ± 0,39
Banana Prata - P2	110,43 ± 16,70	<0,89	<1,09	1,20 ± 0,61
Mamão Caipira - P1	51,98 ± 8,57	<0,81	1,09 ± 0,48	1,34 ± 0,69
Banana Prata Mel - P2	106,00 ± 14,94	<0,95	<1,16	0,72 ± 0,37
Alface Lisa - P3	50,39 ± 7,31	1,06 ± 0,22	1,33 ± 0,58	1,09 ± 0,56
Agrião - P3	70,46 ± 10,05	<0,87	1,81 ± 0,77	0,89 ± 0,46
Chuchu - P1	92,23 ± 13,02	<0,87	1,70 ± 0,73	0,80 ± 0,41
Cebola Roxa - P3	64,80 ± 10,42	<0,87	<1,04	0,99 ± 0,51
Limão Taiti - P1	35,75 ± 5,31	1,31 ± 0,26	<1,01	0,87 ± 0,45
Banana Maçã - P2	90,67 ± 12,74	<0,76	<0,92	0,74 ± 0,38
Abacate - P3	74,45 ± 11,67	<0,82	<1,00	0,28 ± 0,15
Laranja Bahia - P3	59,86 ± 8,58	<0,83	1,26 ± 0,55	2,07 ± 1,06
Banana Figo - P2	102,48 ± 15,58	0,98 ± 0,21	1,06	0,60 ± 0,31
Caqui - P2	33,10 ± 6,01	<0,81	<0,99	1,04 ± 0,54
Abacaxi - P1	25,55 ± 5,18	<0,91	<1,10	0,56 ± 0,29
Laranja Lima - P3	62,74 ± 8,99	<0,85	<1,06	0,95 ± 0,49
Banana d'água - P2	97,40 ± 13,75	<0,90	1,58 ± 0,68	1,04 ± 0,53
Banana Ouro - P2	95,47 ± 13,45	<0,83	2,37 ± 1,00	0,89 ± 0,46
Batata Doce - P2	110,25 ± 15,40	<0,78	1,60 ± 0,68	3,62 ± 1,84
Beterraba - P3	70,41 ± 10,02	1,45 ± 0,29	3,30 ± 1,37	3,11 ± 1,58

Fonte: Elaborada pelo autor.

Continuação da Tabela 5.1

Amostra - Origem	Concentração de atividade (Bq·kg ⁻¹)			
	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²²⁸ Th
Nabo - P3	78,56 ± 11,13	1,86 ± 0,36	2,57 ± 1,08	3,28 ± 1,67

Fonte: Elaborada pelo autor.

Concentrações de atividade do ⁴⁰K foram detectadas em todas as amostras analisadas, variando entre o menor valor de 21,62 ± 3,41 Bq·kg⁻¹, observado na chicória (P3), e o maior de 117,42 ± 16,46 Bq·kg⁻¹, registrado no inhame (P1). Já o radionuclídeo ²²⁶Ra foi identificado em apenas cinco amostras: alface (P3), limão taiti (P1), banana figo (P2), beterraba (P3) e nabo (P3), com valores variando de 0,98 ± 0,21 Bq·kg⁻¹ na banana figo (P2) até 1,86 ± 0,36 Bq·kg⁻¹ no nabo (P3). As concentrações de ²²⁸Ra apresentaram o menor valor de 1,09 ± 0,48 Bq·kg⁻¹ no mamão caipira (P1) e o maior de 3,30 ± 1,37 Bq·kg⁻¹ na beterraba (P3). Quanto ao ²²⁸Th, foram encontradas concentrações em 24 das 27 amostras, com exceção da chicória (P3), do inhame (P1) e do limão siciliano (P1), cujos valores ficaram abaixo do limite de detecção (AMD). As menores e maiores concentrações de ²²⁸Th foram observadas no abacate (P3) e na batata doce (P2), com valores de 0,28 ± 0,15 e 3,62 ± 1,84 Bq·kg⁻¹, respectivamente, nas amostras *in natura*.

Embora haja muitos fatores que interferem na absorção e acúmulo de determinados nutrientes, de acordo com De Oliveira [161], plantas produtoras de raízes tuberosas, tubérculos e túberas, geralmente necessitam de grande quantidade de potássio. Esta característica pode explicar a maior concentração do ⁴⁰K no inhame.

A Tabela 5.2 apresenta a comparação entre resultados obtidos para a concentração de atividade específica do ⁴⁰K de algumas amostras *in natura* do presente trabalho com os da literatura de referência. O autor do trabalho de referência analisou amostras *in natura* por espectrometria gama, com o mesmo tempo de contagem. Entretanto, as amostras analisadas por Lopes [152] são provenientes de agricultura de manejo convencional.

Tabela 5.2: Comparação das concentrações de atividade do ^{40}K ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Alimento	Presente trabalho	Lopes, 2018 (Referência)	Diferença percentual (%)
Abacaxi	$25,55 \pm 5,18$	$49,00 \pm 5,16$	-47,9
Banana prata	$110,43 \pm 16,70$	$92,42 \pm 5,89$	19,5
Banana d'água	$97,40 \pm 13,75$	$129,96 \pm 7,08$	-25,1
Cenoura	$101,83 \pm 15,47$	$119 \pm 7,98$	-14,4
Mamão caipira	$81,23 \pm 12,78$	* $83,09 \pm 5,53$	-2,3
Mamão caipira	$81,23 \pm 12,78$	** $62,15 \pm 4,22$	23,5
Couve	$81,23 \pm 12,78$	$94,94 \pm 6,85$	-14,4
Alface	$50,39 \pm 7,31$	$95,96 \pm 8,51$	-47,5
Beterraba	$70,41 \pm 10,02$	$266,33 \pm 13,90$	-73,6
Aipim	$47,41 \pm 7,77$	$178,55 \pm 10,89$	-73,4
Chuchu	$92,23 \pm 13,02$	$61,02 \pm 6,25$	51,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

(*) Mamão formosa.

(**) Mamão havaí.

O autor do trabalho de referência utiliza a denominação “mandioca”. Enquanto no presente estudo o vegetal é identificado como aipim, denominação comum na cidade do Rio de Janeiro. A referência também apresenta os resultados de dois tipos de mamão, formosa e havaí. A menor diferença percentual entre as concentrações de atividade foi para comparação entre o mamão caipira e o mamão formosa, 2,2%. A maior diferença foi para a beterraba, 73,6%.

Os valores positivos indicam maior concentração de atividade do ^{40}K nos produtos orgânicos em comparação com os convencionais. A variação entre as formas de manejo, orgânico e convencional, refletem a complexidade da interação entre os fatores que influenciam a mobilidade e a migração dos radionuclídeos naturais do solo para a planta.

De modo geral, o manejo convencional, que faz uso de fertilizantes sintéticos, frequentemente os fosfatados, tende a apresentar maiores concentrações de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{232}Th , isso porque o material constituinte destes insumos possui teores mais elevados desses radionuclídeos (MORTVEDT [123], IAEA [162]). O uso contínuo desses fertilizantes pode provocar um aumento da concentração dos radionuclídeos naturais

no solo.

O manejo orgânico, por sua vez, embora não utilize fertilizantes sintéticos, pode apresentar concentrações de atividade superiores às do manejo convencional, pois fatores como a quantidade de matéria orgânica, a biodisponibilidade do potássio, por exemplo, a competição iônica e a especiação química. O rádio é quimicamente semelhante ao cálcio e isso pode afetar sua absorção a depender da quantidade de cálcio no solo (FRISSEL [124], RIBEIRO [62]).

A partir dos valores das concentrações de atividade, foram calculadas as doses efetivas devido à ingestão dos alimentos orgânicos analisados nesta primeira etapa. Na literatura, há poucos trabalhos com análise de vegetais de cultivo orgânico que sejam rastreáveis (PAIVA ET AL. [163]).

A Tabela 5.3 apresenta os valores encontrados para as doses efetivas devido à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th para os vegetais da primeira etapa deste trabalho.

Os intervalos das doses efetivas anuais devido à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th , pelo consumo dos vegetais, analisados nesta primeira etapa, foram de 0,08 a 4,40 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$) para o ^{40}K , 0,28 a 1,63 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$) para o ^{226}Ra , 0,30 a 9,73 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$) para o ^{228}Ra e 0,02 a 0,63 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$) para o ^{228}Th , respectivamente. As doses efetivas anuais mais elevadas foram devidas ao consumo da banana ouro, 13,63 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$) e da banana d'água, 10,51 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$), e a dose efetiva anual mais baixa, 0,01 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$), foi atribuída ao consumo de abacaxi. A dose efetiva anual total determinada nesta primeira etapa foi de 96,10 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$).

Tabela 5.3: Dose efetiva anual estimada para os radionuclídeos nas amostras *in natura* ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$)

Amostra	Dose efetiva anual - Def ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$)				Total Def ($\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$)
	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	
Couve	0,25	—	0,86	0,03	1,13
Chicória	0,17	—	—	—	0,17
Cenoura	0,23	—	0,30	0,03	0,55
Inhame	0,53	—	0,84	—	1,37
Aipim	1,11	—	1,67	0,27	1,38
Limão Siciliano	0,54	—	—	—	0,54

Fonte: Elaborada pelo autor.

Continuação da Tabela 5.3

Amostra	Dose efetiva anual - Def ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)				Total Def ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)
	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	
Limão Galego	0,37	—	3,05	0,18	3,60
Banana Prata	4,40	—	3,66	0,51	8,57
Mamão Caipira	0,84	—	1,70	0,22	2,75
Banana Prata Mel	3,91	—	—	0,31	4,22
Alface Lisa	0,30	0,28	0,87	0,08	1,52
Agrião	0,54	—	1,55	0,08	2,17
Chuchu	0,21	—	0,43	0,02	0,66
Cebola Roxa	0,56	—	—	0,09	0,65
Limão Taiti	0,71	1,18	—	0,20	2,10
Banana Maçã	3,34	—	—	0,32	3,66
Abacate	1,64	—	—	0,06	1,71
Laranja Bahia	1,45	—	3,40	0,58	5,43
Banana Figo	4,10	1,63	—	0,26	5,98
Caqui	0,96	—	—	0,24	1,20
Abacaxi	0,08	—	—	0,02	0,10
Laranja Lima	1,52	—	—	0,27	1,79
Banana d'água	3,60	—	6,47	0,45	10,51
Banana Ouro	3,52	—	9,73	0,38	13,63
Batata Doce	1,65	—	2,66	0,63	4,93
Beterraba	1,08	1,01	4,41	0,56	7,05
Nabo	1,21	1,29	5,64	0,59	8,73
Total	38,80	5,39	45,54	6,36	96,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 5.1 apresenta a dose efetiva anual considerando a contribuição de todos os radionuclídeos analisados e a contribuição somente dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th de acordo com as categorias: folhosas, tuberosas e tubérculos, legumes e frutas. O gráfico mostra que ao considerar o ^{40}K , a dose foi aumentada em 33,4% para folhosas, 31,8% para as tuberosas e tubérculos, 144,0% para os legumes e 89,0% para as frutas indicando a importância deste macronutriente para os vegetais e que este radionuclídeo é o que mais contribui para a dose efetiva anual, entretanto, por estar em equilíbrio homeostático com o corpo humano, após a sua incorporação expõe o organismo à dose. Para avaliação de provável risco radiológico a contribuição dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th na dose por ingestão é a comumente observada.

O ^{228}Th foi o radionuclídeo que mais contribuiu para dose efetiva comprometida anual estimada, $45,54\mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$.

De acordo com as categorias, as frutas são as que oferecem a maior dose efetiva anual por ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th , seguidas pelas tuberosas e tubérculos, folhosas e legumes. Estes resultados expressam o comportamento relativo à dieta alimentar das pessoas que adquirem produtos na feira de orgânicos.

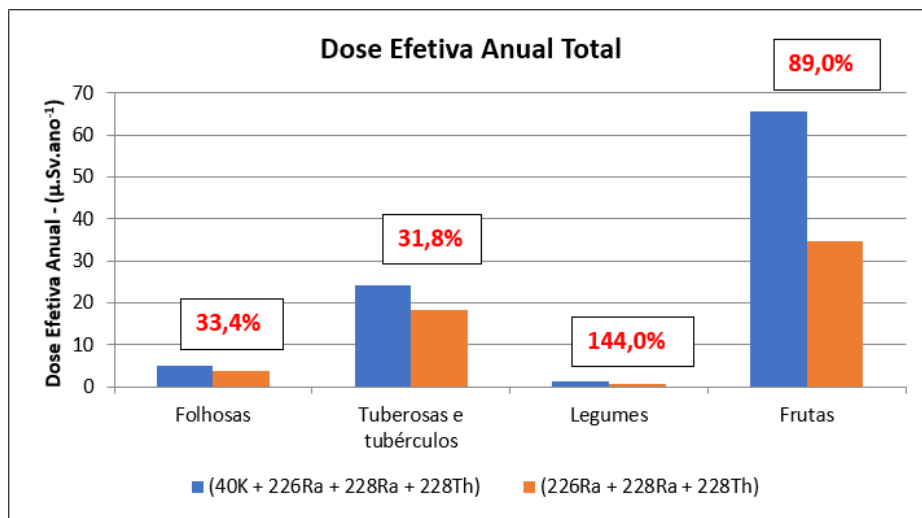


Figura 5.1: (a)Feira de orgânicos de Campo Grande; (b)Feira de orgânicos do Re-creio.

Fonte: Elaboração Própria, 2024.

5.2 Amostras de vegetais – etapa 2

Na etapa 2 deste estudo, vegetais adquiridos na feira e desumidificados foram analisados. A Tabela 5.4 mostra as concentrações de atividade de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th .

Concentrações de atividade de ^{40}K foram encontradas em todas as amostras, com

o menor valor de $(192,56 \pm 28,60) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ para o limão galego e o maior de $(706,55 \pm 99,08) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ para a salsa crespa. Dos 13 vegetais analisados nesta etapa, apenas quatro apresentaram concentrações de ^{226}Ra superiores à AMD, com o menor valor de $(1,62 \pm 0,58) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ para a manga e o maior de $(3,38 \pm 1,11) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ para o jiló. As menores e maiores concentrações de atividade de ^{228}Ra foram observadas no limão galego $(1,38 \pm 0,72) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ e na cenoura $(13,15 \pm 5,61) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente. Para o ^{228}Th , os valores variaram entre $(0,60 \pm 0,42) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ no aipim e $(8,07 \pm 4,28) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ na salsa crespa.

Tabela 5.4: Concentração de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nas amostras *in natura*.

Amostra	Concentração de atividade ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)			
	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th
Aipim	$265,04 \pm 39,18$	$< 1,36$	$3,44 \pm 1,60$	$0,60 \pm 0,42$
Banana figo	$324,48 \pm 48,78$	$< 2,01$	$2,23 \pm 1,21$	$1,08 \pm 0,68$
Banana prata	$327,66 \pm 48,99$	$2,52 \pm 0,82$	$2,49 \pm 1,30$	$1,49 \pm 0,86$
Banana prata mel	$387,42 \pm 56,42$	$< 1,62$	$< 1,57$	$0,63 \pm 0,43$
Batata yacon	$369,89 \pm 54,34$	$< 1,75$	$< 1,70$	$< 0,32$
Cenoura	$428,67 \pm 62,84$	$< 1,96$	$13,15 \pm 5,61$	$1,18 \pm 0,70$
Chicória	$571,10 \pm 80,18$	$< 1,07$	$1,82 \pm 0,90$	$1,26 \pm 0,75$
Couve	$500,33 \pm 73,42$	$3,04 \pm 0,99$	$8,14 \pm 3,64$	$1,45 \pm 0,84$
Limão galego	$192,56 \pm 28,60$	$< 1,07$	$1,38 \pm 0,72$	$1,43 \pm 0,84$
Mamão caipira	$350,07 \pm 51,25$	$< 1,58$	$8,32 \pm 3,61$	$< 0,54$
Jiló	$443,23 \pm 104,00$	$3,38 \pm 1,11$	$< 2,56$	$1,88 \pm 1,23$
Salsa crespa	$706,55 \pm 99,08$	$< 2,11$	$11,12 \pm 4,82$	$8,07 \pm 4,28$
Manga	$279,91 \pm 40,47$	$1,62 \pm 0,58$	$11,56 \pm 5,01$	$0,55 \pm 0,42$

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 5.5 apresenta resultados da literatura sobre a CA de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em alguns dos alimentos analisados na segunda etapa deste trabalho.

As CAs de ^{40}K — $(324,48 \pm 48,78)$, $(327,66 \pm 48,99)$ e $(387,42 \pm 56,42) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ — encontradas neste estudo para os três tipos de banana são comparáveis aos valores

apresentados por Oladele *et al.* [143], $(27,47-705,65) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. A banana prata mel, em particular, apresentou valor de $(387,42 \pm 56,42) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, comparável ao resultado de Prihart *et al.* [164], $(401,59 \pm 5,85) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A CA de ^{40}K na batata analisada neste estudo, $(369,89 \pm 54,34) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, está acima do valor obtido por Al-Hamzawi [165], $(120,54 \pm 4,65) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, porém comparável ao de PRIHART ET AL. [164]).

Kandić *et al.* [166] apresentaram valores de CA de ^{40}K (460 ± 24) , (420 ± 21) e $(704 \pm 36) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ na chicória, que estão de acordo com o valor obtido no presente estudo, $(571,10 \pm 80,18) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A CA de ^{40}K na couve, apresentada por Adjirackor *et al.* [167], $(489,70 \pm 3,90) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, é comparável ao valor deste estudo, $(500,33 \pm 73,42) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Prihart *et al.* [164] encontraram para o mamão uma CA de ^{40}K de $(651,64 \pm 9,75) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, valor acima do obtido neste estudo, $(350,07 \pm 51,25) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Os mesmos autores determinaram a CA de ^{226}Ra de $(0,90 \pm 0,64) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, enquanto no presente estudo a CA de ^{226}Ra ficou abaixo da AMD.

Neste estudo, o valor obtido para a CA de ^{40}K no limão foi de $(192,56 \pm 28,60) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, acima do valor determinado por Cardoso *et al.* [63], $(36 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A CA de ^{226}Ra na banana prata obtida neste trabalho, $(2,52 \pm 0,82) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, está abaixo da faixa de valores apresentados por Oladele *et al.* [143], $(4,8 \pm 3,8) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A CA de ^{226}Ra determinada para a couve, $(3,04 \pm 0,99) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, é comparável ao valor apresentado por Adjirackor *et al.* [167], $(4,8 \pm 3,8) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Adjirackor *et al.* [167] obtiveram o valor de $(2,31 \pm 18,5) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ para a CA de ^{228}Ra , enquanto neste estudo o valor obtido foi de $(8,14 \pm 3,64) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A CA de ^{228}Th na batata ficou abaixo do limite de detecção neste estudo, enquanto Pietrzak-Flis *et al.* [168] encontraram o valor de $(3,52 \pm 0,61) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Na cenoura, a CA de ^{228}Th encontrada por Pietrzak-Flis *et al.* [168] foi de $(25,2 \pm 3,00) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, enquanto no presente estudo o valor obtido foi significativamente menor, $(1,18 \pm 0,70) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Tabela 5.5: Concentração de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) — dados da literatura.

Amostra	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	Referência
Aipim	*72,09–431,58 $220,71 \pm 30,66$	*1,37–29,09 $1,45 \pm 2,03$	—	—	Oladele <i>et al.</i> [143]

Fonte: Dados organizados pelo autor a partir das referências citadas. *Intervalo.

Continuação da Tabela 5.5

Amostra	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	Referência
Banana	*27,47–705,65 $302,88 \pm 55,49$	*4,83–18,04 $9,30 \pm 0,84$	–	–	Oladele <i>et al.</i> [143]
Banana	$401,59 \pm 5,85$	–	–	–	Prihart <i>et al.</i> [164]
Batata	$120,54 \pm 4,65$	$11,46 \pm 0,41$	–	–	Al-Hamzawi [165]
Batata	–	$13,7 \pm 1,5$	–	$3,52 \pm 0,61$	Pietrzak-Flis <i>et al.</i> [168]
Cenoura	$398,85 \pm 6,89$	–	–	–	Prihart <i>et al.</i> [164]
Cenoura	–	154 ± 10	–	$25,2 \pm 3,00$	Pietrzak-Flis <i>et al.</i> [168]
Chicória	460 ± 24 420 ± 21 704 ± 36	–	–	–	Kandić <i>et al.</i> [166]
Couve	$489,7 \pm 3,9$	$4,8 \pm 3,8$	$2,31 \pm 18,5$	–	AdjirackoR <i>et al.</i> [167]
Limão	36 ± 2	–	–	–	Cardoso <i>et al.</i> [63]
Mamão	$651,64 \pm 9,75$	$0,90 \pm 0,64$	–	–	Prihart <i>et al.</i> [164]

Fonte: Dados organizados pelo autor a partir das referências citadas. *Intervalo.

A Tabela 5.6 apresenta as doses efetivas anuais por ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th pelo consumo dos vegetais analisados na segunda etapa deste estudo.

Tabela 5.6: Dose efetiva anual devido à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th .

Amostra	Dose efetiva anual ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)			
	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th
Aipim	3,09	—	4,46	0,08
Banana figo	2,58	—	1,97	0,10
Banana prata	2,74	0,95	2,32	0,15
Banana prata mel	3,69	—	—	0,07
Batata yacon	0,19	—	—	—
Cenoura	0,09	—	0,29	0,00
Chicória	0,25	—	0,09	0,01
Couve	0,16	0,04	0,29	0,01
Limão galego	0,73	—	0,58	0,06
Mamão caipira	0,50	—	1,33	—
Manga	0,42	0,11	1,92	0,01
Jiló	0,59	0,20	—	0,03
Salsa	0,70	—	1,22	0,09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os intervalos das doses efetivas anuais devido à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th , em $\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ pelo consumo dos vegetais analisados foram de 0,09 a 3,69 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$) para o ^{40}K , 0,04 a 0,95 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$) para o ^{226}Ra , 0,09 a 4,46 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$) e 0,01 a 0,15 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$), respectivamente. As doses efetivas anuais mais elevadas foram devidas ao consumo do aipim, 7,63 $\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$, e da banana prata, 6,16 $\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$, e a dose efetiva anual mais baixa foi atribuída ao consumo de batata. A dose efetiva anual total determinada nesta segunda etapa foi de 32,11 $\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$.

A maior dose efetiva anual, para este grupo de vegetais, foi atribuída ao ^{40}K , 15,73 $\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$, embora apresente o menor coeficiente de dose, de acordo com a ICRP 119 [12], como apresentado na secção 4.14. Entretanto, as concentrações de atividade deste radionuclídeo foram maiores do que as encontradas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th .

5.3 Amostras de vegetais e solo – Etapa 3

As concentrações de atividade de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em vegetais orgânicos e solos coletados em local específico no PEPB, Rio de Janeiro, foram calculadas por espectrometria gama para estimar a dose efetiva comprometida e o fator de transferência desses radionuclídeos. Como na literatura, a relação entre a CA na planta e a CA no solo costuma ser denominada fator de transferência solo-planta, indicando a quantidade de radionuclídeos que migram de um sistema para o outro; nesta seção, o termo planta e vegetal são utilizados indistintamente.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados encontrados para a concentração de atividade do ^{40}K presente nos vegetais e nos solos de plantio correspondentes e o fator de transferência solo-planta.

Tabela 5.7: Concentração de atividade (CA) do ^{40}K nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.

Amostra	^{40}K		
	CA Vegetal ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CA Solo ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	FT Solo-planta
Abacaxi	$265,54 \pm 38,64$	$863,91 \pm 117,86$	$0,31 \pm 0,06$
Banana Prata	$441,71 \pm 61,74$	$797,41 \pm 108,83$	$0,55 \pm 0,11$
Beterraba	$628,62 \pm 87,26$	$664,28 \pm 90,78$	$0,95 \pm 0,18$
Brócolis	$765,79 \pm 106,09$	$815,01 \pm 111,23$	$0,94 \pm 0,18$
Caqui	$257,92 \pm 36,84$	$663,42 \pm 90,70$	$0,39 \pm 0,08$
Cenoura	$546,82 \pm 76,15$	$638,55 \pm 87,10$	$0,86 \pm 0,17$
Couve Kale	$792,97 \pm 109,59$	$854,08 \pm 116,52$	$0,93 \pm 0,18$
Lja Bahia	$319,28 \pm 44,39$	$838,53 \pm 114,44$	$0,38 \pm 0,07$
Lja L Pérsia	$261,18 \pm 36,44$	$736,46 \pm 100,58$	$0,35 \pm 0,07$
Limão Galego	$282,31 \pm 39,41$	$1112,98 \pm 151,82$	$0,25 \pm 0,05$
Limão Taiti	$134,08 \pm 19,38$	$823,29 \pm 112,39$	$0,16 \pm 0,03$
Mamão Caipira	$462,86 \pm 64,67$	$846,74 \pm 115,53$	$0,55 \pm 0,11$
Nabo	$664,08 \pm 92,07$	$585,93 \pm 80,10$	$1,13 \pm 0,22$

Radicchio	$1984,75 \pm 271,72$	$839,55 \pm 114,57$	$2,36 \pm 0,46$
-----------	----------------------	---------------------	-----------------

Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico na Figura 5.2 apresenta as concentrações de atividade do ^{40}K nos vegetais e nos solos e o fator de transferência solo-planta.

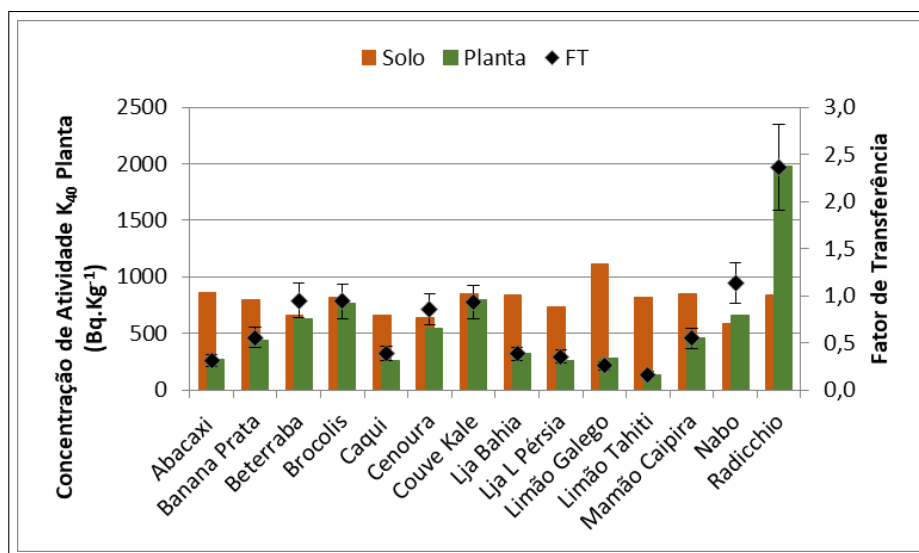


Figura 5.2: Concentração de Atividade (CA) do ^{40}K nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

O valor mais baixo de concentração de atividade de ^{40}K para vegetais foi encontrado no limão Taiti ($134,08 \pm 19,38 \text{ Bq.kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado no radicchio ($1984,75 \pm 271,72 \text{ Bq.kg}^{-1}$). O valor mais baixo de concentração de atividade de ^{40}K para solos foi encontrado no cultivo de nabo ($585,93 \pm 80,10 \text{ Bq.kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado no cultivo de limão galego ($1112,98 \pm 151,82 \text{ Bq.kg}^{-1}$). Para o fator de transferência (FT), os valores mais baixos e mais altos foram ($0,16 \pm 0,03$) no cultivo de limão Taiti e ($2,36 \pm 0,46$) no radicchio, respectivamente.

Os FTs correspondentes às plantações de nabo e radicchio indicam uma concentração de atividade mais elevada de ^{40}K na planta do que no solo. No caso dos nabos, uma explicação possível é que eles crescem no subsolo, colocando-os em contato direto com radionuclídeos e permitindo que os absorvam do solo. Há também a possibilidade de o vegetal absorver o radionuclídeo e acumulá-lo na parte comestível, enquanto a concentração no solo diminui devido às dinâmicas naturais e também à interferência humana, como a chuva e a rega.

O isótopo natural ^{40}K corresponde a aproximadamente 0,0117% do potássio total e está presente em praticamente todos os ecossistemas agrícolas. A absorção de potássio pelas plantas é diretamente proporcional à concentração de ^{40}K em seus

tecidos. Por esse motivo esse radionuclídeo é amplamente utilizado como indicador de equilíbrio radiológico e nutricional em alimentos e solos (IAEA [162]; unsear [87]).

Quando comparada a atividade específica de ^{40}K entre duas espécies cultivadas na mesma região e sob a mesma técnica de cultivo, a orgânica, o radicchio e o nabo é importante observar como as diferenças fisiológicas e geoquímicas afetam a absorção desse radionuclídeo natural. Sendo assim, o radicchio, hortaliça folhosa de metabolismo C3 e crescimento lento, apresenta alta demanda de potássio para manutenção da turgescência celular e outros processos metabólicos. Além disso, possui um sistema radicular superficial que favorece a absorção do potássio trocável disponível nas camadas superiores do solo, onde a atividade microbiana e a matéria orgânica aumentam a biodisponibilidade de nutrientes. Desta forma, o radicchio apresenta maiores valores de atividade específica de ^{40}K nos tecidos foliares.

O nabo, por outro lado, é uma espécie que direciona grande parte dos nutrientes à raiz tuberosa, rica em carboidratos e relativamente pobre em minerais. Assim, a quantidade de potássio e consequentemente de ^{40}K é menor na parte comestível, especialmente quando se analisa apenas a raiz. Assim, a diferença observada entre as duas espécies reflete características fisiológicas e anatômicas, e não qualquer anomalia radiológica.

As variações observadas também podem ser explicadas pelas características geoquímicas do solo da Pedra Branca, que apresenta composição granítica e gnáissica, com alta presença de feldspatos potássicos e micas. Mesmo em condições de cultivo orgânico, a forma química do potássio no solo (potássio trocável, solúvel ou estrutural) e a profundidade de absorção radicular determinam diferenças nas atividades específicas observadas entre as espécies. Esses resultados estão em conformidade com valores reportados pela IAEA [162] e pela FAO/IAEA [65], que indicam faixas típicas de 30 a 200 Bq/kg de ^{40}K em alimentos vegetais cultivados em solos não contaminados.

De acordo com Oladele [143], FT inferiores a 1 indicam forte afinidade de ligação do radionuclídeo ao solo e menor bioacumulação nas plantas. Já os valores de FT maiores do que 1 indicam absorção ativa e bioacumulação na planta.

Velasco *et al.* [169] mencionam estudo em que analisaram tecidos vegetais de limão, laranja, goiaba, manga, abacate, mamão e pimenta malagueta, e demonstraram que a absorção de nutrientes e elementos radioativos pelas raízes depende em grande parte do tipo de planta. No referido estudo, os autores verificaram que as concentrações de K^+ , NH_4^+ , $^{137}\text{Cs}^+$ nas raízes e em outras partes do vegetal, são influenciadas pela absorção direta do solo e pelo movimento desses cátions nos compartimentos da planta. Velasco *et al.* [169] ainda afirmam que a extensão da translocação difere muito e depende do radionuclídeo e do desenvolvimento da árvore.

A Tabela 5.8 apresenta os resultados encontrados das concentrações de atividade do ^{226}Ra presentes nos vegetais e nos solos de plantio correspondentes.

Tabela 5.8: Concentração de atividade (CA) do ^{226}Ra nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.

Amostra	^{226}Ra		
	CA Vegetal (Bq·kg ⁻¹)	CA Solo (Bq·kg ⁻¹)	FT Solo-planta
Abacaxi	<MDA	16,39 ± 2,96	–
Banana Prata	<MDA	16,51 ± 2,88	–
Beterraba	4,47 ± 1,53	21,32 ± 3,71	0,21 ± 0,08
Brócolis	3,95 ± 1,12	19,66 ± 3,41	0,20 ± 0,07
Caqui	4,74 ± 1,30	16,75 ± 2,97	0,28 ± 0,09
Cenoura	<MDA	21,14 ± 3,68	–
Couve Kale	<MDA	15,69 ± 2,78	–
Lja Bahia	<MDA	21,10 ± 3,70	–
Lja L Pérsia	4,13 ± 0,95	14,42 ± 2,59	0,28 ± 0,08
Limão Galego	1,67 ± 0,78	52,61 ± 9,10	0,03 ± 0,02
Limão Taiti	2,13 ± 0,77	14,46 ± 2,62	0,15 ± 0,06
Mamão Caipira	4,67 ± 1,62	18,86 ± 3,27	0,25 ± 0,10
Nabo	5,47 ± 1,44	13,59 ± 2,39	0,40 ± 0,13
Radicchio	4,24 ± 1,01	20,03 ± 3,49	0,21 ± 0,06

Fonte: Elaboração própria com base nos dados obtidos experimentalmente, 2025.

O gráfico na Figura 5.3 apresenta as concentrações de atividade do ^{226}Ra nos vegetais e nos solos e o fator de transferência do solo para os vegetais.

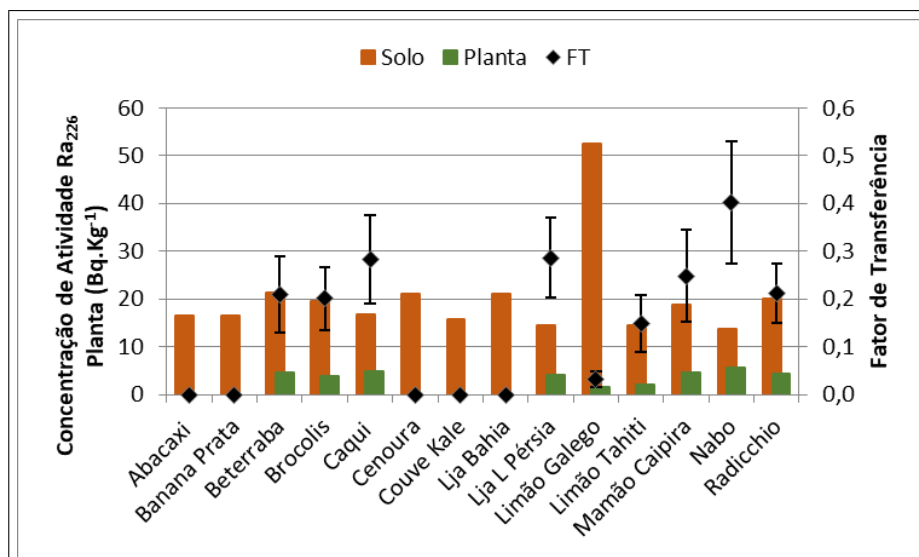


Figura 5.3: Concentração de Atividade (CA) do ²²⁶Ra nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

O valor mais baixo da concentração de atividade de ²²⁶Ra para vegetais foi encontrado no limão galego ($1,67 \pm 0,78 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado no nabo ($5,47 \pm 1,44 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). O valor mais baixo da concentração de atividade de ²²⁶Ra para solos foi encontrado no cultivo de nabo ($13,59 \pm 2,39 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado no cultivo de limão galego ($52,61 \pm 9,10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). Para o fator de transferência FT, os valores mais baixos e mais altos foram ($0,03 \pm 0,02$) no cultivo de limão galego e ($0,40 \pm 0,13$) no nabo, respectivamente.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados encontrados das concentrações de atividade do ²²⁸Ra presentes nos vegetais e nos solos de plantio correspondentes.

Tabela 5.9: Concentração de atividade (CA) do ²²⁸Ra nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.

Amostra	²²⁸ Ra		
	CA Vegetal (Bq.kg ⁻¹)	CA Solo (Bq.kg ⁻¹)	FT Solo-planta
Abacaxi	<MDA	114,43 ± 46,17	–
Banana Prata	<MDA	69,38 ± 28,02	–
Beterraba	16,79 ± 7,37	162,71 ± 65,63	0,10 ± 0,06
Brócolis	19,72 ± 8,27	74,37 ± 30,02	0,26 ± 0,15

Fonte: Elaboração própria com base nos dados obtidos experimentalmente, 2025.

Continuação da Tabela 5.9

Amostra	²²⁸ Ra		
	CA Vegetal (Bq·kg ⁻¹)	CA Solo (Bq·kg ⁻¹)	FT Solo-planta
Caqui	5,51 ± 3,37	82,90 ± 33,50	0,07 ± 0,05
Cenoura	32,75 ± 13,60	164,54 ± 66,49	0,20 ± 0,12
Couve Kale	12,21 ± 6,12	74,09 ± 29,91	0,16 ± 0,11
Lja Bahia	6,34 ± 2,85	84,21 ± 34,02	0,08 ± 0,05
Lja L Pérsia	3,15 ± 1,28	78,98 ± 31,89	0,04 ± 0,02
Limão Galego	4,59 ± 2,58	40,30 ± 16,73	0,11 ± 0,08
Limão Taiti	5,77 ± 2,70	74,18 ± 29,99	0,078 ± 0,05
Mamão Caipira	3,96 ± 2,31	72,99 ± 29,47	0,05 ± 0,04
Nabo	12,95 ± 5,86	39,21 ± 15,90	0,33 ± 0,20
Radicchio	14,32 ± 6,30	76,05 ± 30,72	0,19 ± 0,11

Fonte: Elaboração própria com base nos dados obtidos experimentalmente, 2025.

O gráfico na Figura 5.9 apresenta as concentrações de atividade do ²²⁸Ra nos vegetais e nos solos e o fator de transferência do solo para os vegetais.

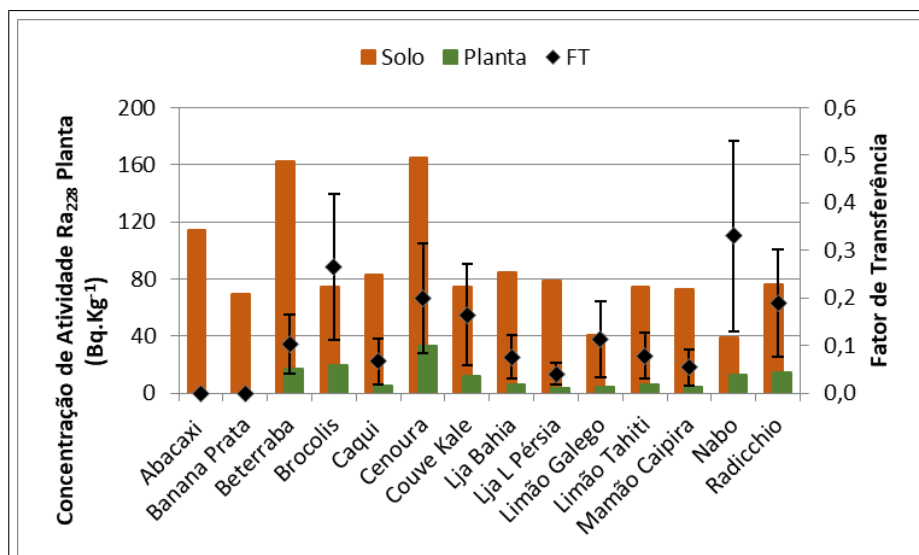


Figura 5.4: Concentração de Atividade (CA) do ^{228}Ra nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

O valor mais baixo de concentração de atividade de ^{228}Ra para vegetais foi encontrado na laranja lima da Pérsia ($3,15 \pm 1,28 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado na cenoura ($32,75 \pm 13,60 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$). O valor mais baixo de concentração de atividade de ^{228}Ra para solos foi encontrado no cultivo de limão galego ($40,30 \pm 16,73 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado no cultivo de beterraba ($162,71 \pm 65,63 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$). Para o fator de transferência (FT), os valores mais baixos e mais altos foram ($0,04 \pm 0,02$) no cultivo de limão persa e ($0,33 \pm 0,20$) no nabo, respectivamente.

O ^{226}Ra e o ^{228}Ra ocorrem comumente na água e no solo numa proporção de 1:1, e a geoquímica desses dois radionuclídeos é praticamente a mesma (NATIONAL RESEARCH COUNCIL [170]). A sorção do rádio é altamente dependente da força iônica e da concentração dos íons concorrentes (POWELL ET AL. [171]). Os minerais argilosos e a matéria orgânica podem absorver o rádio, e a quantidade de rádio no solo pode variar consideravelmente tanto local quanto regionalmente. Isso pode ser resultado de fatores como a formação do solo e o tempo de exposição às intempéries (NATIONAL RESEARCH COUNCIL [170]).

Plantas cultivadas em solo contendo radionuclídeos da série do urânio apresentam acumulação consideravelmente menor nas raízes, devido à grande afinidade desses radionuclídeos com locais de troca no solo (D'SOUZA ET AL. [102]).

As concentrações de atividade do ^{226}Ra e do ^{228}Ra estiveram abaixo do mínimo de detecção para o abacaxi. É importante destacar que, conforme depoimento do próprio produtor P3, devido a um período de calor e seca entre o plantio e a colheita do abacaxi, o desenvolvimento da fruta foi afetado, o que resultou em perda de valor comercial. A fruta ficou muito pequena, comparada ao que era esperado; entretanto,

teve proveito para o presente estudo. Gomes [172] afirma que uma seca prolongada causa impactos como a redução da produção agrícola e aponta a necessidade de água para o desenvolvimento do abacaxi. Segundo Oliveira *et al.* [173], o abacaxi possui uma demanda hídrica, especialmente nas fases críticas do desenvolvimento da planta, que pode ser impactada pela distribuição de chuvas e temperaturas. Desta forma, o clima desfavorável pode ser um dos fatores que tiveram como consequência valores de concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{228}Ra abaixo do limite de detecção.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados encontrados das concentrações de atividade do ^{228}Th presentes nos vegetais e solos de plantio correspondentes e o fator de transferência do solo para o vegetal.

Tabela 5.10: Concentração de atividade (CA) do ^{228}Th nos vegetais e nos solos e fator de transferência (FT) solo-planta.

Amostra	^{228}Th		
	CA Vegetal ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CA Solo ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	FT Solo-planta
Abacaxi	$3,10 \pm 1,79$	$97,16 \pm 50,13$	$0,03 \pm 0,02$
Banana Prata	$3,65 \pm 1,97$	$76,87 \pm 39,02$	$0,05 \pm 0,04$
Beterraba	$7,35 \pm 3,83$	$183,39 \pm 93,67$	$0,04 \pm 0,03$
Brócolis	$5,35 \pm 2,83$	$94,95 \pm 48,97$	$0,06 \pm 0,04$
Caqui	$3,26 \pm 1,76$	$89,58 \pm 45,37$	$0,04 \pm 0,03$
Cenoura	$9,86 \pm 5,07$	$137,10 \pm 70,44$	$0,07 \pm 0,05$
Couve Kale	$4,29 \pm 2,34$	$59,79 \pm 30,29$	$0,07 \pm 0,05$
Lja Bahia	$1,96 \pm 1,11$	$96,98 \pm 49,96$	$0,02 \pm 0,02$
Lja L Pérsia	$1,59 \pm 0,92$	$86,66 \pm 43,89$	$0,018 \pm 0,01$
Limão Galego	$2,01 \pm 1,13$	$431,24 \pm 219,11$	$0,0047 \pm 0,005$
Limão Taiti	$2,00 \pm 1,13$	$90,51 \pm 45,84$	$0,022 \pm 0,02$
Mamão Caipira	$3,30 \pm 1,85$	$82,90 \pm 41,99$	$0,040 \pm 0,03$
Nabo	$4,41 \pm 2,41$	$120,21 \pm 61,80$	$0,037 \pm 0,03$
Radicchio	$3,86 \pm 2,17$	$62,12 \pm 31,47$	$0,062 \pm 0,05$

Fonte: Elaboração própria com base nos dados obtidos experimentalmente, 2025.

O gráfico na Figura 5.5 apresenta as concentrações de atividade do ^{228}Th nos vegetais e nos solos e o fator de transferência do solo para os vegetais.

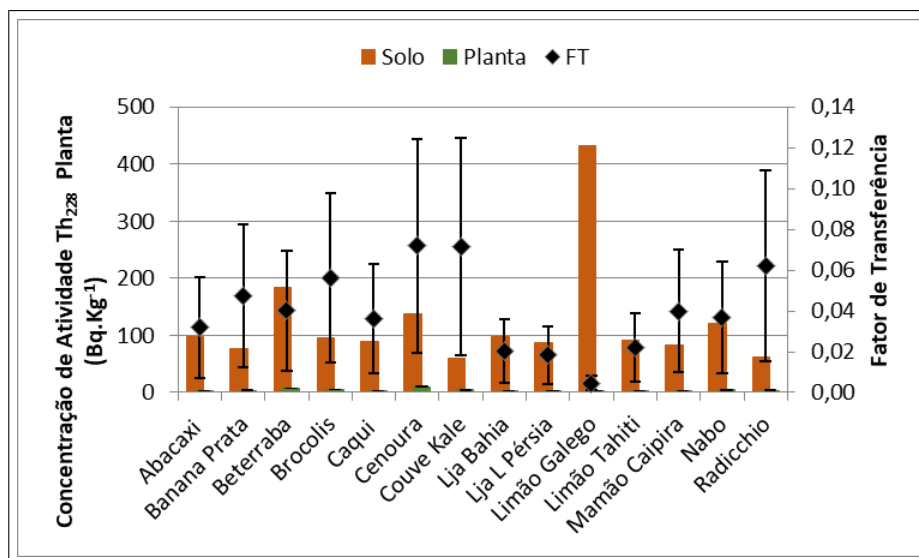


Figura 5.5: Concentração de Atividade (CA) do ^{228}Th nos vegetais e solos e Fator de Transferência (FT) solo-planta.

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

O valor mais baixo de concentração de atividade de ^{228}Th para vegetais foi encontrado na laranja lima da Pérsia ($1,59 \pm 0,92 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado na cenoura ($9,86 \pm 5,07 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). O valor mais baixo de concentração de atividade de ^{228}Th para solos foi encontrado no cultivo de couve ($59,79 \pm 30,29 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), e o mais alto foi encontrado no cultivo de limão galego ($431,24 \pm 219,11 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). Para o fator de transferência (FT), os valores mais baixos e mais altos foram ($0,0047 \pm 0,005$) no cultivo de limão galego e ($0,07 \pm 0,05$) para o nabo e a cenoura, respectivamente.

O tório é menos absorvido pelas plantas quando comparado com o rádio (análogo ao cálcio), pois este radionuclídeo é biologicamente mais disponível.

De acordo com Viana [174], a existência de diferentes tipos de solo, vegetação e clima significa que o mesmo radionuclídeo pode apresentar uma ampla gama de valores de transferência. Em seu trabalho, Viana [174] apresenta uma variação no fator de transferência (FT) do ^{226}Ra para amostras de cenoura que varia de $3,0 \times 10^{-2}$ a $1,5 \times 10^{-1}$ (em solos de clima tropical) e de $2,5 \times 10^{-3}$ a $5,7 \times 10^{-3}$ (em solos de clima temperado). No presente estudo, não foi possível calcular o FT solo-planta do ^{226}Ra para cenoura, devido à concentração de atividade (CA) deste radionuclídeo na cenoura ter ficado abaixo da atividade mínima detectável (AMD).

Os baixos valores de fator de transferência (FT) podem ser explicados pela mobilidade do tório, que é restrita nas plantas devido à sua adsorção pelos materiais da parede celular Azeez *et al.* [72]. Em geral, a concentração de radionuclídeos no solo reflete sua concentração total, e não a quantidade disponível para as plantas.

Consequentemente, a maioria dos valores de FT é bastante baixa MORTVEDT[123].

Oladele *et al.* [143] analisaram diversos vegetais e seus solos e encontraram valores de FT solo-planta para o ^{40}K , que variaram de 0,05 a 15,0. Estes valores englobam aqueles encontrados neste estudo ($0,16 \pm 0,03 - 2,36 \pm 0,46$). Comparando o intervalo de FT para o ^{226}Ra obtido por Oladele [143] (0,04 – 21,30), observa-se que não é compatível com o deste estudo ($0,03 \pm 0,02 - 0,40 \pm 0,13$).

Haque e Ferdous [175] calcularam o FT dos vegetais: arroz, espinafre, batata, cenoura e rabanete, e encontraram valores de 0,24 – 0,72 para o ^{40}K , 0,04 – 0,10 para o ^{226}Ra e 0,12 – 0,32 para o ^{228}Ra . Esses valores são comparáveis aos encontrados neste estudo para os mesmos radionuclídeos.

De acordo com Peixoto e Henkes [176], o estudo do processo de transferência de material radioativo do solo para a planta é o passo inicial para conduzir medidas de proteção radiológica.

Conforme depoimento do próprio produtor P3, devido a um período com temperaturas altas e seca entre o plantio e a colheita do abacaxi, o desenvolvimento da fruta foi afetado, o que resultou em perda de valor comercial. A fruta ficou muito pequena, comparada ao que era esperado, entretanto, teve proveito para o presente estudo. Gomes [172] afirma que uma seca prolongada causa impactos como a redução da produção agrícola e aponta a necessidade de água para o desenvolvimento do abacaxi. Segundo Oliveira *et al.* [177], o abacaxi possui uma demanda hídrica, especialmente nas fases críticas do desenvolvimento da planta, que pode ser impactada pela distribuição de chuvas e temperaturas. Desta forma, o clima desfavorável pode ser um dos fatores que tiveram como consequência valores da concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{228}Ra abaixo do limite de detecção.

Plantas cultivadas em solo contendo radionuclídeos da série do urânio, sua acumulação nas raízes é consideravelmente menor devido à grande afinidade desses radionuclídeos com locais de troca no solo (D'SOUZA ET AL. [102]).

A Figura 5.6 mostra a correlação entre as concentrações de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nos vegetais e nos solos correspondentes ao cultivo.

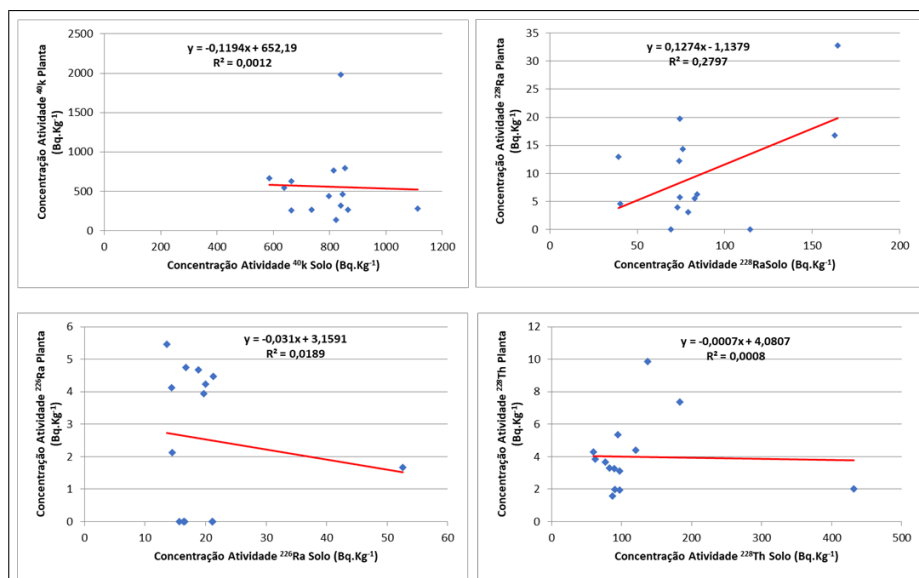


Figura 5.6: Correlação entre as concentrações de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th .

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

As correlações lineares entre as concentrações de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nas plantas e nos solos correspondentes de cultivo, encontradas neste estudo, são muito fracas. No caso do ^{228}Ra , apesar do coeficiente ser positivo, a correlação não é suficiente para associar o aumento de concentração de atividade no solo com o encontrado na planta. Estes resultados assinalam que as concentrações de atividade desses radionuclídeos no solo não influenciam significativamente as quantidades que chegam às plantas. Isto sugere que outros fatores afetam a absorção dos radionuclídeos, como estágio fisiológico da planta, propriedades físico-químicas, disponibilidade para as plantas e características metabólicas das diferentes espécies vegetais (HASAN [178]; AZEEZ, MANSOUR E AHMAD [72]).

A abundância de nutrientes na solução do solo pode afetar a absorção radicular de radionuclídeos. Se estes forem análogos químicos dos nutrientes, pode haver competição por carreadores no processo de absorção pelo vegetal, provocando uma redução na transferência de determinados radionuclídeos do solo para a planta (WASSERMAN [179]).

Santos [117] salienta que diferentes tipos de solo, vegetação e tecnologia empregada na produção agrícola resultam em uma grande dispersão nos valores de FT solo-plantas medidos para um determinado elemento.

Nos anos de 2023 e 2024 foram analisados vegetais em comum (banana prata, cenoura, couve, limão galego e mamão caipira), todos produzidos no sítio do P3. A diferença entre os vegetais está na forma de aquisição, de modo que em 2023 os vegetais foram obtidos na Feira de Orgânicos e em 2024 foram coletados no próprio local de cultivo. A metodologia de preparo e análise das mostras foi a mesma.

As concentrações de atividade do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th encontradas para estas amostras são apresentadas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Concentração de radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th nos vegetais nos anos de 2023 e 2024.

Amostra	2023				2024			
	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th
Banana	327,66	2,52 ±	2,49 ±	1,49 ±	441,71 ±	<2,03	<3,96	3,65 ±
prata	± 48,99	0,82	1,30	0,86	61,74			
Cenoura	428,67	<1,96	13,15	1,18 ±	546,82 ±	<1,81	32,75 ±	9,86 ±
	± 2,84		± 5,61	0,70	76,15		13,60	5,07
Couve	500,33	3,04 ±	8,14 ±	1,45 ±	792,97 ±	<1,94	12,21 ±	9,86 ±
	± 3,42	0,99	3,64	0,84	109,59		6,12	5,07
Limão	192,56	<1,07	1,38 ±	1,43 ±	282,31 ±	1,67 ±	4,59 ±	2,01 ±
galego	± 8,60		0,72	0,84	39,41	0,78	2,58	1,13
Mamão	350,07	<1,58	8,32 ±	<0,54	462,86 ±	4,67 ±	3,96 ±	3,30 ±
caipira	± 51,25		3,61		64,67	1,62	2,31	1,85

Fonte: Elaboração própria com base em experimentos realizados, 2023/2024.

É importante ressaltar que, praticamente para todos os alimentos analisados na comparação entre os dois anos, houve um aumento na concentração de atividade dos radionuclídeos. Para a banana prata, o ^{226}Ra e o ^{228}Ra foram registrados com concentrações de atividade em 2023, porém, em 2024 os valores encontrados para estes radionuclídeos ficaram abaixo da atividade mínima detectável. Valores de concentração de ^{226}Ra na cenoura, nos dois anos consecutivos, também ficaram abaixo do nível detectável. Para a couve, o ^{226}Ra foi identificado no ano de 2023, mas no ano seguinte, o valor ficou abaixo da atividade mínima detectável. O ^{226}Ra não foi detectado no limão galego em 2023. Na análise do mamão caipira, as concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Th ficaram abaixo do nível de detecção em 2023.

Comparativamente aos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th , as concentrações de ^{40}K são significativamente maiores. A Figura 5.7 mostra a concentração de atividade do ^{40}K nos alimentos analisados nos anos de 2023 e 2024.

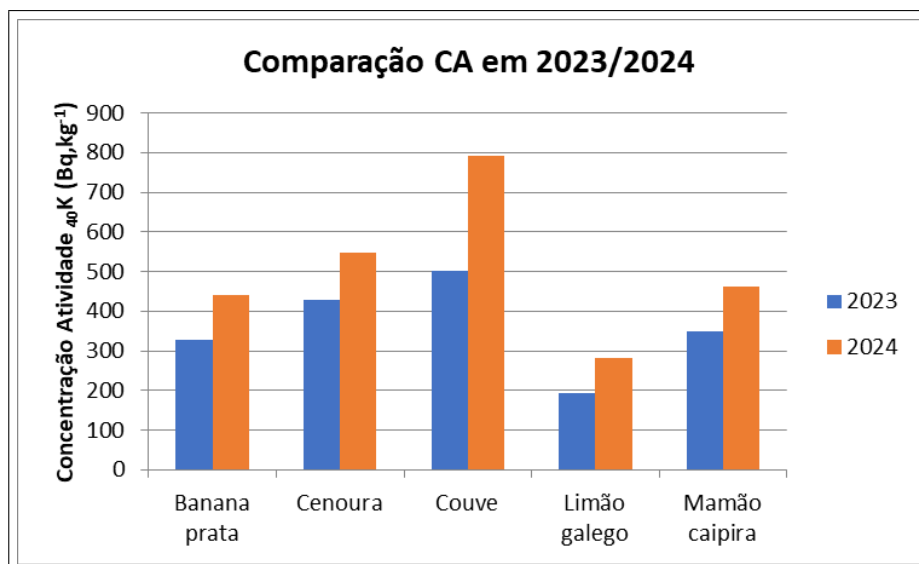


Figura 5.7: Concentração de atividade do ^{40}K nos vegetais em 2023 e 2024.

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

O gráfico mostra que as concentrações de atividade do ^{40}K nos vegetais selecionados foram maiores em 2024. Muitos fatores influenciam a absorção de radionuclídeos pelas plantas e um deles é o regime das chuvas, como um fator ambiental. No Quadro 5.1 são apresentados registros pluviométricos dos anos de 2023 e 2024, disponibilizados pelo Sistema Alerta Rio.

Registro das Precipitações	Médias da rede pluviométrica (mm)	
	2023	2024
Acumulado médio	108,5	99,9
Total anual	1300,5	1198,2

Quadro 5.1: Registros pluviométricos do município do Rio de Janeiro em 2023 e 2024.

Fonte: Organizado pelo autor com dados do Sistema Alerta Rio.

O Alerta Rio é um sistema de alerta de chuvas intensas de deslizamento de encostas. O sistema conta com 33 estações telemétricas espalhadas por todas as regiões do Município do Rio de Janeiro que enviam dados sobre o vento, temperatura e umidade. Das 33 estações, 25 enviam leitura apenas de chuvas. De acordo com os dados apresentados no Quadro 5.1, o ano de 2023 foi mais chuvoso que o de 2024. Embora a diferença dos registros pluviométricos entre os dois anos tenha sido menor que 10%, a intensidade das chuvas deve ser considerada na possibilidade de influência nas concentrações de atividade aumentadas no ano de 2024.

A chuva provoca lixiviação, ou seja, alguns radionuclídeos podem ser “lavados”, reduzindo as chances de absorção pelas plantas. Com períodos mais secos, os radionuclídeos podem ficar mais concentrados e possivelmente disponíveis para as plantas.

No ano de 2024, o produtor P3 relatou dificuldade com alguns de seus vegetais por conta do intenso calor e da falta de chuvas num determinado período, a ponto de não poder vendê-los na feira. Um desses vegetais foi a cenoura, que por conta do clima não se desenvolveu bem e ficou com aspecto desfavorável para a comercialização. Entretanto, esses vegetais foram coletados para esta pesquisa.

A Figura 5.8 mostra o tamanho reduzido das cenouras, fora do esperado pelo produtor. De acordo com o produtor P3, não fosse o presente estudo, estes vegetais teriam sido descartados, pois além do tamanho, o aspecto das cenouras com a casca não era atrativo ao público.



Figura 5.8: Cenoura coletada em 2024.

Fonte: Arquivo pessoal.

As médias mundiais de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais de ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th , nos solos, são 400 Bq kg^{-1} , 35 Bq kg^{-1} , 35 Bq kg^{-1} e 30 Bq kg^{-1} .

No presente estudo os intervalos de concentração de atividade para o ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th foram $(585,93 \pm 80,10 - 1112,98 \pm 151,82) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(13,59 \pm 2,39 - 52,61 \pm 9,10) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(40,30 \pm 16,73 - 162,71 \pm 65,63) \text{ Bq kg}^{-1}$ e $(59,79 \pm 30,29 - 431,24 \pm 219,11) \text{ Bq kg}^{-1}$, respectivamente. Os valores obtidos superam a média mundial de concentração de atividade. Uma justificativa para estes valores mais

altos pode apontar para a área de coleta, que, segundo SANTOS [3], está localizada na Suíte Suruí, Leucogranito Pedra Branca, que agrupa granitos intrusivos (rochas plutônicas, formadas em confinamento, regiões profundas da Crosta Terrestre).

O granito é uma rocha constituída principalmente de quartzo, feldspatos e micas, sendo o feldspato potássico a principal fonte de ^{40}K (SANTOS [3]; ROCHA [180]). Além disso, rochas ígneas, como o granito, possuem quantidades significativas de urânio e tório em sua composição (PINHEIRO [181]). Assim, a formação geológica contribui para valores mais elevados desses radionuclídeos naturais.

Também foi estimada a dose efetiva comprometida devido à ingestão dos alimentos, adquiridos na etapa 3, a partir das concentrações de atividade dos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th determinadas nesta etapa da pesquisa, como mostra a Figura 5.9.

As doses efetivas anuais totais, e seus intervalos, pela ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th devido ao consumo dos vegetais orgânicos foram determinadas como $13,99 (0,09 - 4,07) \mu\text{Sv ano}^{-1}$, $3,92 (0,00 - 1,53) \mu\text{Sv ano}^{-1}$, $21,82 (0,00 - 4,89) \mu\text{Sv ano}^{-1}$, $1,39 (0,01 - 0,39) \mu\text{Sv ano}^{-1}$. Deste grupo de vegetais analisados, o caqui foi o que apresentou maior valor de dose efetiva comprometida, $8,05 \mu\text{Sv ano}^{-1}$, com destaque para a contribuição do ^{228}Ra . A dose efetiva anual mais baixa, $0,11 \mu\text{Sv ano}^{-1}$, foi atribuída ao consumo do abacaxi. A dose efetiva anual total estimada na terceira etapa foi de $41,12 \mu\text{Sv ano}^{-1}$.

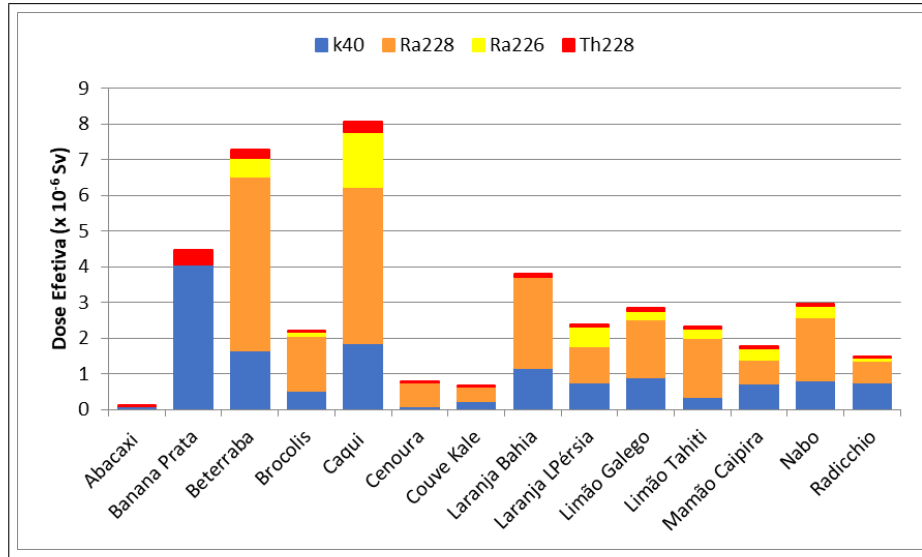


Figura 5.9: Dose efetiva devido à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th .

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Considerando as três etapas desenvolvidas neste estudo, o menor e o maior valor de concentração de atividade de ^{40}K foram $(21,62 \pm 3,41) \text{ Bq kg}^{-1}$ para a chicória e $(1984,75 \pm 271,72) \text{ Bq kg}^{-1}$ no radicchio. Para o ^{226}Ra , o menor e o maior valor foram $(0,98 \pm 0,21) \text{ Bq kg}^{-1}$ na banana figo e $(5,47 \pm 1,44) \text{ Bq kg}^{-1}$ no nabo. A menor

e a maior concentração de ^{228}Ra foram $(1,09 \pm 0,48) \text{ Bq kg}^{-1}$ no mamão caipira e $(32,75 \pm 13,60) \text{ Bq kg}^{-1}$ na cenoura. Para o ^{228}Th , a menor e a maior concentração de atividade foram $(0,28 \pm 0,15) \text{ Bq kg}^{-1}$ no abacate e $(9,86 \pm 5,07) \text{ Bq kg}^{-1}$ na cenoura.

É importante destacar que as menores concentrações de atividade foram encontradas nos vegetais adquiridos na feira, na primeira etapa deste estudo, e as maiores nos vegetais coletados diretamente no local de cultivo, durante a terceira etapa, que foram analisados após a retirada de umidade. É provável que tenha havido uma redução na contagem devido às amostras terem sido analisadas frescas e congeladas. Por outro lado, as amostras coletadas diretamente do local de cultivo foram desumidificadas, o que favorece a contagem, o que se nota principalmente para o ^{40}K .

Além disso, os vegetais que apresentaram menores concentrações foram todos adquiridos na feira em períodos diferentes dos que foram coletados no sítio, e ainda, o mamão caipira foi adquirido do produtor (P1), a banana figo do produtor (P2), a cenoura e o abacate do produtor (P3). Levando em conta todos os fatores que afetam a concentração de atividade, como a dinâmica do solo com suas características, a fase de desenvolvimento que se encontrava cada vegetal quando foi coletado, a influência mais provável que justifica esta coincidência dos menores valores para as amostras congeladas e maiores para as secas, deve ser, neste caso, a diferença no preparo das amostras.

Uma observação adicional a respeito da concentração de atividade dos radionúclídeos naturais analisados é que, em todas as etapas, nos grupos de vegetais analisados, as maiores concentrações de atividade foram encontradas nos vegetais não frutíferos, a saber:

- concentrações de ^{40}K : inhame $(117,42 \pm 16,46) \text{ Bq kg}^{-1}$, salsa crespa $(706,55 \pm 99,08) \text{ Bq kg}^{-1}$ e radicchio $(1984,75 \pm 271,72) \text{ Bq kg}^{-1}$;
- concentrações de ^{226}Ra : nabo $(1,86 \pm 0,36) \text{ Bq kg}^{-1}$, jiló $(3,38 \pm 1,11) \text{ Bq kg}^{-1}$ e nabo $(5,47 \pm 1,44) \text{ Bq kg}^{-1}$;
- concentrações de ^{228}Ra : beterraba $(3,30 \pm 1,37) \text{ Bq kg}^{-1}$, cenoura $(13,15 \pm 5,61) \text{ Bq kg}^{-1}$ e cenoura $(32,75 \pm 13,60) \text{ Bq kg}^{-1}$;
- concentrações de ^{228}Th : batata-doce $(3,62 \pm 1,84) \text{ Bq kg}^{-1}$, salsa crespa $(8,07 \pm 4,28) \text{ Bq kg}^{-1}$ e cenoura $(9,86 \pm 5,07) \text{ Bq kg}^{-1}$.

As menores concentrações de atividade foram identificadas nas frutas, à exceção da chicória e do aipim. Assim, os resultados obtidos foram:

- concentrações de ^{40}K : chicória ($21,62 \pm 3,41$) Bq kg^{-1} , limão galego ($192,56 \pm 28,60$) Bq kg^{-1} e limão Taiti ($134,08 \pm 19,38$) Bq kg^{-1} ;
- concentrações de ^{226}Ra : banana figo ($0,98 \pm 0,21$) Bq kg^{-1} , manga ($1,62 \pm 0,58$) Bq kg^{-1} e limão galego ($1,67 \pm 0,78$) Bq kg^{-1} ;
- concentrações de ^{228}Ra : mamão caipira ($1,09 \pm 0,48$) Bq kg^{-1} , limão galego ($1,38 \pm 0,72$) Bq kg^{-1} e laranja lima da Pérsia ($3,15 \pm 1,28$) Bq kg^{-1} ;
- concentrações de ^{228}Th : abacate ($0,28 \pm 0,15$) Bq kg^{-1} , aipim ($0,60 \pm 0,42$) Bq kg^{-1} e laranja lima da Pérsia ($1,59 \pm 0,92$) Bq kg^{-1} .

O quadro 5.2 resume os valores obtidos.

Radionuclídeo	Maiores CA (Bq kg^{-1})	Menores CA (Bq kg^{-1})
^{40}K	Radicchio ($1984,75 \pm 271,72$) Salsa cressa ($706,55 \pm 99,08$) Limão galego ($192,56 \pm 28,60$)	Chicória ($21,62 \pm 3,41$) Inhame ($117,42 \pm 16,46$) Limão Taiti ($134,08 \pm 19,38$)
^{226}Ra	Nabo ($5,47 \pm 1,44$) Jiló ($3,38 \pm 1,11$) Manga ($1,62 \pm 0,58$)	Banana figo ($0,98 \pm 0,21$) Limão galego ($1,67 \pm 0,78$) Nabo ($1,86 \pm 0,36$)
^{228}Ra	Cenoura ($32,75 \pm 13,60$) Cenoura ($13,15 \pm 5,61$) Lja lima Pérsia ($3,15 \pm 1,28$)	Mamão caipira ($1,09 \pm 0,48$) Limão galego ($1,38 \pm 0,72$) Beterraba ($3,30 \pm 1,37$)
^{228}Th	Cenoura ($9,86 \pm 5,07$) Salsa cressa ($8,07 \pm 4,28$) Batata-doce ($3,62 \pm 1,84$)	Abacate ($0,28 \pm 0,15$) Aipim ($0,60 \pm 0,42$) Lja lima Pérsia ($1,59 \pm 0,92$)

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Quadro 5.2: Resumo dos valores de concentração de atividade dos radionuclídeos naturais nos vegetais analisados.

Os valores de concentração de atividade encontrados no presente estudo estão maiores do que os da média mundial publicados pela (UNSCEAR [1]). Para frutas e raízes, os valores médios são de 30, 20 e 0,5 mBq kg^{-1} para ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th , respectivamente. Para as folhosas, os valores médios são de 50, 40 e 15 mBq kg^{-1} para ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th , respectivamente.

Entretanto, as doses efetivas comprometidas, estimadas a partir das concentrações de atividade devido à ingestão dos vegetais orgânicos analisados, são inferiores à média mundial de 290 $\mu\text{Sv ano}^{-1}$.

Em todas as amostras, de vegetais e de solos, foram encontradas concentrações de ^{40}K , confirmando a abundância do potássio na crosta terrestre e nas plantas. No Maciço da Pedra Branca há muitos vestígios da exploração do carvão vegetal, ocorrida no passado, com a formação de solos antropogênicos com fragmentos de carvão. Embora exista a possibilidade de a presença desses fragmentos alterar algumas propriedades físico-químicas do solo, como o pH, e consequentemente a dinâmica de alguns radionuclídeos no solo, as concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais com valores acima da média de referência dada pela UNSCEAR [1], a formação geológica é que deve justificar estes resultados.

6

Conclusão

Neste estudo, foram identificados e analisados os radionuclídeos naturais ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th em amostras de vegetais e de solos de cultura orgânica provenientes do PEPB. Foi utilizada a espectrometria gama com uso de um detector HPGe e com os softwares Genie 2k para aquisição e armazenamento de dados em conjunto com o LabSocs para simular as eficiências de detecção.

Foi determinada a concentração de atividade dos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th presentes nos vegetais e nos solos. No geral, os valores de concentração de atividade desses radionuclídeos estão maiores do que os da média mundial publicados pela , mas encontram concordância com a literatura.

Com base nos dados de consumo alimentar publicados pelo IBGE [11] e no coeficiente de dose publicado pela ICP 119 [12], foram estimados, em todas as etapas deste estudo, os valores de dose efetiva anual devida à ingestão de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th através dos vegetais orgânicos, produzidos no PEPB. Os resultados foram: $96,10 \mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$ na etapa 1; $32,11 \mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$ na etapa 2 e $42,12 \mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$ na etapa 3. Estes valores são inferiores à média mundial de referência, $290 \mu\text{Sv} \cdot \text{ano}^{-1}$, indicada pela UNSCEAR, e inferiores ao limite, $1 \text{ mSv} \cdot \text{ano}^{-1}$, estabelecido pela ICRP, para indivíduos do público.

Com base no contexto desta pesquisa, pode-se concluir que os consumidores de vegetais orgânicos cultivados no PEPB, sejam eles frequentadores das Feiras de Orgânicos geridas pela Agropрата e/ou adeptos do turismo ecológico na região, não estão com a saúde sob risco, devido à radiação natural proveniente da ingestão dos radionuclídeos analisados.

A associação entre aumento de concentração de atividade de radionuclídeos naturais e o uso de fertilizantes sintéticos não é unanimidade no meio científico, entretanto há dados na literatura que mostram a possibilidade de incremento de dose, principalmente com o uso de fertilizantes fosfatados. Como no cultivo orgânico é vedado o uso desse tipo de fertilizante, os resultados obtidos a partir da análise de uma grande variedade desses produtos cultivados no PEPB podem constituir uma

base de dados que pressupõe a não utilização destes insumos. É fundamental enfatizar que a produção e comercialização de alimentos efetuadas pelos membros da Agroprata obedecem às regras de produção orgânica vigentes no país.

OFT solo-planta foi estimado para os seguintes vegetais orgânicos: abacaxi, banana prata, beterraba, brócolis, caqui, cenoura, couve kale, laranja bahia, laranja lima da Pérsia, limão galego, limão taiti, mamão caipira, nabo e radicchio. Os valores de FT solo-planta encontrados variaram de $(0,16 \pm 0,03 - 2,36 \pm 0,46)$ para o ^{40}K , $(0,03 \pm 0,02 - 0,40 \pm 0,13)$ para o ^{226}Ra , $(0,04 \pm 0,02 - 0,33 \pm 0,20)$ para o ^{228}Ra e $(0,0047 \pm 0,005 - 0,07 \pm 0,05)$ para o ^{228}Th . Os resultados apresentam grande variação, como aponta Frissel [124], indicando que o parâmetro FT integra inúmeros processos químicos e físicos dos vegetais e dos solos que, por sua vez, são influenciados por outros fatores. Ainda assim, os resultados obtidos para os FT encontram pontos de concordância com a literatura.

Ao verificar a correlação entre as CA do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th presentes nos vegetais e nos solos, os resultados assinalam que as concentrações de atividade desses radionuclídeos no solo não influenciam significativamente as quantidades que chegam às plantas. Isto sugere que outros fatores, sejam climáticos, características físico-químicas, fisiologia e fase de desenvolvimento do vegetal, estejam interferindo na dinâmica do sistema solo-planta.

6.1 Considerações finais e Propostas de trabalhos futuros

O Parque Estadual da Pedra Branca possui 23 trilhas, sendo a Trilha do Rio de Prata, local onde se encontra a sede da Associação Agroprata, uma das trilhas, que recebe o nome de Trilha do Rio da Prata. Considerando-se o turismo ecológico e de aventura realizado no Parque, pretende-se estender a pesquisa para outras trilhas, através da análise de alimentos cultivados em sítios locais e consumidos por visitantes, transferência solo-planta, bem como a realização de levantamento radiométrico nessas regiões. Também pretende-se realizar a análise da potabilidade radiológica dos açudes e córregos e cachoeiras localizadas no parque, visto serem locais de coleta de água para consumo ou utilizadas para banho por visitantes. A extensão dos estudos para outras trilhas permitirá a criação do background natural do Parque Estadual da Pedra Branca, bem como a proposição da criação de um selo que indique que os alimentos produzidos na região possuem concentrações de atividade de radionuclídeos dentro dos padrões nacionais e internacionais, bem como servindo como mais uma comprovação da não utilização de fertilizantes de uso proibido em plantação orgânicas e agroecológicas.

Neste estudo, compondo o título, foram utilizadas as expressões “reserva ambiental” e “ taxa de migração de radionuclídeos”, em referência aos termos técnicos Unidade de Conservação e fator de transferência solo-planta, respectivamente.

Referências Bibliográficas

- [1] UNSCEAR – UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *Exposures from natural radiation sources. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. Relatório técnico, United Nations, 2000.
- [2] CÂMARA, A. A. F. “O outro e sua identidade: políticas públicas de remoção e o caso dos agricultores do Parque Estadual da Pedra Branca-RJ”, *Revista Brasileira de Políticas Públicas*, v. 3, n. 2, 2013. Acesso em: 14 ago. 2025.
- [3] SANTOS, D. S. “Avaliação da Geodiversidade do Parque Estadual da Pedra Branca, Rio de Janeiro - RJ”. Monografia, Programa de Pós-Graduação em Geologia do Quaternário, 2014.
- [4] DIAS, M. C. O. “Agricultura urbana na cidade maravilhosa: os agricultores familiares do Maciço da Pedra Branca”, *Revista Idealogando*, v. 2, n. 1, pp. 98–110, 2018.
- [5] PAULA, A. “De olho na saúde, brasileiros demonstram maior interesse por produtos orgânicos”. Disponível em: <https://www.engeplus.com.br/noticia/saude/2019/de-olho-na-saude-brasileiros-demonstram-maior-interesse-por-produtos-organicos>, 2019. Acesso em: 25 set. 2023.
- [6] CIDON, C., THEIS, V., SCHREIBER, D., et al. “Análise da agricultura orgânica na Região Sul do Brasil, sob a perspectiva da sustentabilidade”, *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. Supl. 1, pp. 1–19, 2021.
- [7] MOURÃO, I. M. “Agricultura biológica recomendada na Europa como uma forma de minimizar as alterações climáticas”, *Revista AGROTEC*, v. 35, pp. 14–17, 2020.
- [8] ROCHA, L. “Saiba como identificar alimentos ultraprocessados”. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/saude/saiba-como-identificar-alimentos-ultraprocessados/>, 2022. Acesso em: 17 set. 2023.

- [9] OLIVEIRA, M. A. S. A. O., PENA, I. A. B., PEIXOTO, I. “Ampliando Horizontes Para o Turismo no Rio da Prata de Campo Grande a Partir da Perspectiva do Uso Público no Parque Estadual da Pedra Branca-RJ”, *Revista Turismo em Análise*, 2020.
- [10] INEA – INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. “Resumo Executivo do Plano de Manejo do Parque Estadual da Pedra Branca”. Disponível em: <http://www.femerj.org/wp-content/uploads/Plano-de-manejo-do-Parque-Estadual-da-Pedra-Branca-PEPB-Resumo-executivo.pdf>, 2013. Acesso em: 17 jul. 2022.
- [11] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018: Avaliação nutricional da disponibilidade domiciliar de alimentos no Brasil*. Relatório técnico, IBGE, Rio de Janeiro, 2020.
- [12] ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60*. Relatório Técnico Publication 119, ICRP, 2012.
- [13] IDIS – INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DO INVESTIMENTO SOCIAL. “O que são ODS e o que eles têm a ver com impacto social”. Disponível em: <https://www.idis.org.br/o-que-sao-ods-e-o-que-eles-tem-a-ver-com-impacto-social>, 2023. Acesso em: 14 jan. 2024.
- [14] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. “As Nações Unidas no Brasil”. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>, 2025. Acesso em: 4 ago. 2025.
- [15] DIAS, M. C. O. *Parque Estadual da Pedra Branca: o visível e o invisível na paisagem de um território em disputa*. Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Seropédica, RJ, 2017.
- [16] PRADO, B. D. A., MATTOS, C., FERNANDEZ, A. C. F. “Agricultores do Maciço da Pedra Branca-RJ: em busca de reconhecimento de seus espaços de vida”, *Revista Agriculturas: experiências em agroecologia*, v. 9, n. 2, pp. 6–9, 2012.
- [17] SARDINHA, T. S. S. *Análise dos problemas ambientais em unidades de conservação: o Parque Nacional da Tijuca e o Parque Estadual da Pedra Branca-RJ*. Dissertação (mestrado), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto de Geografia, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: [Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/bitstream/Disponível>](https://www.bdt.d.uerj.br:8443/bitstream/Disponível)

1/13401/1/Dissertacao%20completa%20Thalyta%20Sardinha.pdf>.

Acesso em: 31 out. 2025.

- [18] BALIEIRO, F. C., ET AL. *Comunidades Quilombolas do Maciço da Pedra Branca preservam o solo da maior Floresta Urbana do planeta e incrementam seus estoques de carbono do solo*. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2023.
- [19] INEA – INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. *Parque Estadual da Pedra Branca – Mapa de localização*. Relatório técnico, INEA, Rio de Janeiro, 2018. Fonte: IBGE, DigitalGlobe, Google, Esri/Here/Geographic, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, GIS User Community. Sistema de coordenadas: SIRGAS 2000. Projeção: UTM Zona 23S.
- [20] AS-PTA. “Título do documento ou página consultada”. Disponível em: <https://aspta.org.br/>, 2023. sem data Acesso em: 31 out. 2025.
- [21] SANTOS, V. S., ET AL. “Composição do estrato arbóreo de um paleoterritório de carvoeiros no Maciço da Pedra Branca, RJ”, *Pesquisas Botânicas*, v. 57, pp. 181–192, 2006.
- [22] GARCIA, M. N., LIMA, F. C. D. “Levantamento dos impactos ambientais de uma carvoaria na região do vale do Jamari-Rondônia”. 2022.
- [23] RODRIGUES, A. F., ET AL. “Humic acid composition and soil fertility of soils near an ancient charcoal kiln: are they similar to Terra Preta de Índios soils?” *Journal of Soils and Sediments*, v. 19, n. 3, pp. 1374–1381, 2019.
- [24] SOLÓRZANO, A., BRASIL-MACHADO, A., OLIVEIRA, R. R. D. “Land use and social-ecological legacies of Rio de Janeiro’s Atlantic urban forests: from charcoal production to novel ecosystems”, *Royal Society Open Science*, v. 8, n. 6, pp. 1–15, 2021. doi: 10.1098/rsos.201855. Acesso em: 19 ago. 2025.
- [25] NORONHA, F., FREITAS, M. M., SOLÓRZANO, A. “Os Novos Ecossistemas do “Sertão Carioca”: Transformação da Paisagem e História de Uso da Terra na Bacia do Rio Piabas (1968–2018)”, *Sociedade e Natureza*, v. 34, n. 1, 2022. Disponível em: <Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/64183>>. Acesso em: 01 nov. 2025.
- [26] DO OURO NETO, J., OTHERS. “Taxa de Dose Absorvida no Ar Devido ao Radionuclídeo 40K Presente em amostras de Rochas do Núcleo Piraquara

- PARQUE ESTADUAL DA PEDRA BRANCA”, *Episteme Transversalis*, v. 10, n. 3, 2019.
- [27] SOUZA, E. M., OTHERS. “Determinação dos níveis de radioatividade natural em amostras de solo do Núcleo Piraquara–Parque Estadual da Pedra Branca”, *Acta Scientiae et Technicae*, v. 8, n. 2, 2021.
- [28] DOS SANTOS, N. R., DOMINGUES, A. M., DA SILVA, A. X., et al. “Determinação de curvas de eficiência para análise de presença de radionuclídeos em frutas orgânicas através de espectrometria gama utilizando detector HPGe”, *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 16, n. 12, pp. 33346–33357, 2023. doi: 10.55905/revconv.16n.12-255.
- [29] GUEDES, P. M. K. *Memória, identidade e turismo em contexto de ruralidade: o caso dos agricultores do Rio da Prata/RJ*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [30] DO TURISMO, B. M. *Ecoturismo: orientações básicas*. 2 ed. Brasília, Ministério do Turismo, 2010. Acesso em: 18 jul. 2025.
- [31] LIMA, L., DO AMARAL, T. D., LIMA, C. “Ecoturismo como Alternativa à Promoção do Desenvolvimento Sustentável e à Qualidade de Vida”, *Revista Terceiro Incluído*, v. 15, n. 2, pp. e15206–e15206, 2025.
- [32] VILANI, R. M., DA SILVA COELHO, B. “Ecoturismo no Parque Estadual da Pedra Branca, Rio de Janeiro, Brasil. Visitation and conservation at the Pedra Branca State Park, Rio de Janeiro, Brazil”, *Revista Turismo & Desenvolvimento*, v. 27/28, pp. 535–546, 2017. ISSN: 2182-1453. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/321490491>>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- [33] DOS SANTOS P., P. “A dimensão conceitual do ecoturismo”, *Turismo: Visão e Ação*, v. 1, n. 1, pp. 75–92, 1998. Acesso em: 17 out. 2023.
- [34] OCTAVIANO, C. “Muito além da tecnologia: os impactos da Revolução Verde”, *ComCiência*, 2010. Disponível em: <Disponível em: <https://www.comciencia.br/muito-alem-da-tecnologia-os-impactos-da-revolucao-verde/>>. Acesso em: 06 ago. 2025.
- [35] CANDIOTTO, L. Z. P. “Refletindo sobre o conceito de agricultura orgânica”, *Geografia em Questão*, v. 16, n. 2, pp. 47–66, 2023. Acesso em: 06 ago. 2025.

- [36] SOUSA, A. P. D. “Agricultura orgânica no Brasil como uma alternativa para o desenvolvimento agrícola”, *Revista Eletrônica de Economia da Universidade Estadual de Goiás – UEG*, 2015. Acesso em: 06 ago. 2025.
- [37] MATOS, A. K. V. “Revolução verde, biotecnologia e tecnologias alternativas”, *Cadernos da FUCAMP*, v. 10, n. 12, pp. 1–17, 2011. Acesso em: 06 ago. 2025.
- [38] FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. “Organic Foods Market Size, Share & Industry Analysis, By Category [...], and Regional Forecast, 2024–2032”. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/organic-foods-market-101470>, 2025. Acesso em: 06 ago. 2025.
- [39] LIMA, S. K., GALIZA, M., VALADARES, A., et al. *Produção e consumo de produtos orgânicos no mundo e no Brasil*. Relatório Técnico Texto para Discussão nº 2538, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, Brasília, 2020. Acesso em: 06 ago. 2025.
- [40] SADIQ, M., ADIL, M., PAUL, J. “Organic food consumption and contextual factors: An attitude–behavior–context perspective”, *Business Strategy and the Environment*, v. 32, n. 6, pp. 3383–3397, 2023. Acesso em: 14 nov. 2023.
- [41] VALENÇA, T. G. *Circuito carioca de feiras orgânicas: um olhar geográfico sobre a expansão da comercialização de alimentos orgânicos na cidade do Rio de Janeiro*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [42] MINISTÉRIO DA SAÚDE. “Eu quero me alimentar melhor. O que são alimentos orgânicos?” Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-brasil/eu-quero-me-alimentar-melhor/noticias/2017/o-que-sao-alimentos-organicos>, 2022. Acesso em: 31 jan. 2023.
- [43] DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, B. M. “O que são produtos orgânicos?” Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/o-que-sao-produtos-organicos>, 2020. Acesso em: 17 ago. 2025.
- [44] MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. “Chamada Pública MAPA/CNPq Nº 02/2016: Fomento a Projetos de Agroecologia e Sistemas Orgânicos de Produção”. Disponível em: http://www.cnpq.br/web/guest/noticiasviews/-/journal_

content/56_INSTANCE_a6M0/10157/4105177, 2016. Acesso em: 18 jul. 2025.

- [45] MEDAETS, J. P., FONSECA, M. F. A. C. “Produção orgânica: regulamentação nacional e internacional”. Relatório técnico, Ministério do Desenvolvimento Agrário e NEAD, 2005.
- [46] FOOD CONNECTION. “Como está o consumo de alimentos orgânicos no Brasil?” Disponível em: <https://www.foodconnection.com.br/artigos/como-esta-o-consumo-de-alimentos-organicos-no-brasil/>, 2024. Acesso em: 06 ago. 2025.
- [47] CNDL – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE DIRIGENTES LOJISTAS. “Tendências e inovação: pesquisa aponta crescimento de 16 por cento no consumo de alimentos orgânicos no Brasil em 2023”. Disponível em: <https://cndl.org.br/varejosa/pesquisa-aponta-crescimento-de-16-no-consumo-de-alimentos-organicos-no-brasil-em-2023/>, 2023.
- [48] MIRANDA, S. “Produção de alimentos orgânicos cresce no Brasil em 2025”. Disponível em: <https://espacoorganicoenatural.com.br/2025/05/19/producao-de-alimentos-organicos-cresce-no-brasil-em-2025/>, 2025. Acesso em: 18 ago. 2025.
- [49] ZONTA, E., STAFANATO, J. B., PEREIRA, M. G. “Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais”. In: *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*, Embrapa, pp. 263–303, Brasília, 2021.
- [50] BRASIL, E. C., VIÉGAS, I. D. J. M., SILVA, E. S. A., et al. *Nutrição e adubação: conceitos e aplicações na formação de mudas de pimenta longa*. Relatório Técnico 13, Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 1999.
- [51] BRIGDEN, K., STRINGER, R., SANTILLO, D. *Heavy metal and radionuclide contamination of fertilizer products and phosphogypsum waste produced by The Lebanese Chemical Company, Lebanon*. Relatório técnico, Greenpeace Research Laboratories, University of Exeter, Exeter, UK, 2002.
- [52] BA, V. N., THIEN, B. N., LOAN, T. T. H. “Natural radioactivity level in fly ash samples and radiological hazard at the landfill area of the coal-fired power plant complex, Vietnam”, *Nuclear Engineering and Technology*, v. 54, n. 4, pp. 1431–1438, 2022. doi: 10.1016/j.net.2021.10.017.

- [53] IGNJATOVIĆ, I., SAS, Z., DRAGAŠ, J., et al. “Radiological and material characterization of high volume fly ash concrete”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 168, pp. 38–45, 2017. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.06.021.
- [54] QAMOUCHE, K., EL HAJJAJI, S., EL BOUCH, M., et al. “Radiological characterization of phosphate rocks, phosphogypsum, phosphoric acid and phosphate fertilizers in Morocco: An assessment of the radiological hazard impact on the environment”, *Materials Today: Proceedings*, v. 33, pp. 2892–2897, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.531.
- [55] SILVEIRA, J. W. S. D. D. C., WILDHAGEN, G. R. D. S., RIBEIRO, V. A. L., et al. “Extração líquido-líquido de urânio(VI) do colofanito de Itataia (Santa Quitéria, Ceará) por extratantes orgânicos em presença de ácido fosfórico”, *Química Nova*, v. 31, n. 8, pp. 2159–2164, 2008. doi: 10.1590/S0100-40422008000800042.
- [56] BENITES, V. D. M. “A importância da pesquisa na avaliação da eficiência das tecnologias em fertilizantes fosfatados no Brasil”, *Embrapa Solos*, 2015. Disponível em: <Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1031679/a-importancia-da-pesquisa-na-avaliacao-da-eficiencia-das-tecnologias-em-fertilizantes-fosfatados-no-brasil>>.
- [57] INÁCIO, R. M. *Distribuição elementar e de radionuclídeos na produção e uso de fertilizantes fosfatados no Brasil*. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [58] OLIVEIRA, F. M. D., RODRIGUES E SILVA, C. “Natural radioactivity in mineral phosphate fertilizers and its impacts on human health: an overview”, *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, pp. 118149–118160, 2023. doi: 10.1007/s11356-023-30467-y.
- [59] INÁCIO, R. M. *Avaliação da biodisponibilidade dos radionuclídeos Ra-226, Ra-228 e Pb-210 presentes nos fertilizantes fosfatados e no fosfogesso de procedência nacional*. Tese de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [60] WASSERMAN, M. A. “O meio ambiente e os fertilizantes fosfatados no Brasil”. In: *Anais da 4^a Oficina de Agrominerais*, Brasília, 2001. CETEM/MCT. Disponível em: <Disponível em: <https://cetem.gov.br/antigo/agrominerais/documentos/oficina4/Apresentacao03.pdf>>.

- [61] ESHKARAEV, S., TURAEV, K., ESHKORAEV, S. “Influence of Pesticides on Increasing Soil Radioactivity”, *World Journal of Applied Chemistry*, v. 6, n. 4, pp. 49–54, 2021. doi: 10.11648/j.wjac.20210604.12. Disponível em: <Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362523695_Influence_of_Pesticides_on_Increasing_Soil_Radioactivity>.
- [62] RIBEIRO, F. C. A. *Manejo agrícola e teores de radionuclídeos naturais em vegetais cultivados no Rio de Janeiro*. Tese de Mestrado, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, CNEN, Rio de Janeiro, 2004.
- [63] CARDOSO, L. X. *Análise de radionuclídeos naturais e artificiais do solo e de produtos alimentícios no estado de Sergipe, principalmente na região do platô de Neópolis (SE)*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Sergipe, 2012.
- [64] ARINE, B. B. R. *Melhoramento do índice de detecções na espectrometria gama em amostras ambientais usando inteligência artificial*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista – Campus de Sorocaba, Instituto de Ciência e Tecnologia, Campus de Sorocaba, 2017.
- [65] IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Guideline for radioelement mapping using gamma ray spectrometry*. Relatório Técnico IAEA-TECDOC-1363, IAEA, Vienna, 2003.
- [66] KESSARATIKOON, P., ET AL. “Soil-to-organic Sangyod rice grain transfer factors - TF values - of natural and anthropogenic radionuclides in Phatthalung province, Thailand”. In: *Journal of Physics: Conference Series*, p. 012070. IOP Publishing, 2023.
- [67] HASSAN, Y. M., ET AL. “Radioactivity in staple foodstuffs and concomitant dose to the population of Jigawa state, Nigeria”, *Radiation Physics and Chemistry*, v. 178, pp. 108945, 2021.
- [68] ILORY, A. O., CHETTY, N. “Soil-to-crop transfer of natural radionuclides in farm soil of South Africa”, *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 11, pp. 1–12, 2020. doi: 10.1007/s10661-020-08756-7.
- [69] VAN, T. T., PHAM, T. H., NGUYEN, T. M., et al. “Assessment of activity concentrations, soil-to-plant transfer factors and radiological risks of natural radionuclides in agricultural soils and crops in Vietnam”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 211, pp. 106072, 2020. doi: 10.1016/j.jenvrad.2019.106072.

- [70] THIEN, B. N., BA, V. N., VY, N. T. T., et al. “Estimation of the soil to plant transfer factor and the annual organ equivalent dose due to ingestion of food crops in Ho Chi Minh city, Vietnam”, *Chemosphere*, v. 259, pp. 127432, 2020. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127432.
- [71] ALOMARI, A. H., SALEH, M. A., HASHIM, S., et al. “Radiological dose and health impact to Jordanian populace due to radioactivity in staple food crops from four representative soils in Jordan”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 326, pp. 1679–1689, 2020. doi: 10.1007/s10967-020-07461-6.
- [72] AZEEZ, H. H., MANSOUR, H. H., AHMAD, S. T. “Transfer of natural radioactive nuclides from soil to plant crops”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 147, pp. 152–158, 2019. doi: 10.1016/j.apradiso.2019.03.010.
- [73] SALIH, N. F. “Measurement the natural radioactivity concentration levels of radionuclides in selected vegetables collected from Kirkuk, Iraq using HPGe detector”, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, pp. 1–20, 2021. doi: 10.1080/03067319.2021.1873313.
- [74] GONÇALVES, O. D., ALMEIDA, I. P. S. D. “A energia nuclear”, *Ciência Hoje*, v. 37, n. 220, pp. 36–44, 2005.
- [75] OKUNO, E., YOSHIMURA, E. *Física das radiações*. 2 ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2010.
- [76] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Transfer of Radionuclides in Arid and Semi-Arid Environments for Radiological Environmental Impact Assessment*. Relatório Técnico IAEA-TECDOC-XXXX, IAEA, 2025. Disponível em: <Disponível em: <https://www.iaea.org/projects/crp/k41022>>. Forthcoming publication from the Coordinated Research Project K41022.
- [77] OKUNO, E. *Radiação: efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo, Oficina de Textos, 2018.
- [78] OKUNO, E., VILELA, M. A. C. *Radiação ultravioleta: características e efeitos*. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2005.
- [79] YOSHIMURA, E. M. “Física das radiações: interação da radiação com a matéria”, *Revista Brasileira de Física Médica*, v. 3, n. 1, pp. 57–67, 2009.
- [80] LAMARSH, J. R., BARATTA, A. J. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3 ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2001.

- [81] KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 4 ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2010. ISBN: 978-0-470-13148-0.
- [82] MURRAY, R. L. *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. 5 ed. Raleigh, North Carolina State University, 2000.
- [83] ANDREUCCI, ASSESSORIA E SERVIÇOS TÉCNICOS LTDA. “Aspectos industriais da proteção radiológica”. Disponível em: www.abendi.org.br, 2019. São Paulo.
- [84] LAMARSH, J. R., BARATTA, A. J. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3 ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2001. ISBN: 978-0201824988.
- [85] DOS SANTOS, R. A. “Trabalhos técnicos sobre instrumentação e detectores de radiação”. Dados técnicos disponíveis em Escavador, 2010. Disponível em: <https://www.escavador.com/sobre/5154166/robinson-alves-dos-santos>.
- [86] FOR QUANTUM SCIENCE, Q.-N. I., TECHNOLOGY. “What is a Naturally Occurring Radioactive Material?” https://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/NORMDB/ENG/1_NORM.php#top, 2024. Acesso em: 20 jan. 2024.
- [87] UNSCEAR. “UNSCEAR 2010 Report: Summary of Low-Dose Radiation Effects on Health”. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2010. Disponível em: <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2010.html>.
- [88] IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Exposure due to Radionuclides in Food Other than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 1: Technical Material*. Relatório Técnico Safety Reports Series No. 114, IAEA, Vienna, 2023.
- [89] NEA – NATURAL ENVIRONMENTAL AGENCY. “Health Effects of Ionising Radiation on People”. Disponível em: <https://www.nea.gov.sg/our-services/radiation-safety/understanding-radiation/health-effects-of-ionising-radiation-on-people>, 2024. Acesso em: 20 jan. 2024.
- [90] HAFSI, C., DEBEZ, A., ABDELLY, C. “Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades”, *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 36, n. 5, pp. 1055–1070, 2014.

- [91] CARNEIRO, P. F. P. *Levantamento dos níveis de radioatividade natural no estuário do Complexo Industrial de Suape no estado de Pernambuco*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- [92] ZORB, C., SENBAYRAM, M., PEITER, E. “Potassium in agriculture: status and perspectives”, *Journal of Plant Physiology*, v. 171, n. 9, pp. 656–669, 2014. doi: 10.1016/j.jplph.2013.08.008.
- [93] SPARKS, D. L., HUANG, P. M. “Physical chemistry of soil potassium”. In: Munson, R. D. (Ed.), *Potassium in Agriculture*, American Society of Agronomy, pp. 201–276, Madison, Wisconsin, USA, 1985.
- [94] NUNES, L. D., DA S. MESQUITA, N. A. “O tema radioatividade nas revistas da SBQ e as possíveis contribuições para o ensino de radioatividade na educação básica”, *Química Nova na Escola*, v. 44, n. 4, pp. 18–22, 2013. Disponível em: <Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc44_4/04-CCD-18-22.pdf>.
- [95] AL-MASRI, M. S., ET AL. “Transfer of ^{40}K , ^{238}U , ^{210}Pb , and ^{210}Po from soil to plant in various locations in south of Syria”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 99, n. 2, pp. 322–331, 2008.
- [96] SCHEIBEL, V. *Traços Rádicos em Amostras Alimentares de Exportação do Paraná*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual do Paraná, 2002.
- [97] KUMAR, A. “Naturally Occurring Radioactive Materials and Environmental Impacts”. Technical report or institutional publication, 2022. Acesso em: 4 nov. 2025.
- [98] NOGUEIRA, A. C. “A qualidade da água subterrânea com ênfase na toxicidade dos radionuclídeos na região da Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia, Brasil”, *Informe Técnico-Científico de Prevenção de Desastres e Ordenamento Territorial*, 2021.
- [99] NEGRÃO, S. G. *Determinação dos isótopos naturais de rádio de meias-vidas longas, ^{226}Ra e ^{228}Ra , em águas minerais utilizadas nos balneários de Caxambu (MG) e águas de Lindóia-SP*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [100] TEIXEIRA, L. F. L. *Determinação dos radionuclídeos naturais urânio e tório nos sedimentos superficiais do sistema Cananéia-Iguape*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2017. Acesso em: 24 jul. 2024.

- [101] EISENBUD, M., GESELL, T. F. *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources*. 4 ed. San Diego, Academic Press, 1997. ISBN: 9780122351549.
- [102] D'SOUZA, T. J., MISTRY, K. B. *Comparative uptake of thorium-230, radium-226, lead-210 and polonium-210 by plants*. Relatório técnico, Bhabha Atomic Research Centre (BARC), 1970.
- [103] NADALETI, W. C., ET AL. “Cinética e equilíbrio secular das principais séries radioativas e suas implicações ambientais”, *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 2, n. 2, pp. 1–9, 2016.
- [104] JÚNIOR, J. A. S. *Avaliação radiométrica do U-238, Ra-226, Th-232 e K-40 em uma área anômala do agreste de Pernambuco*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.
- [105] XAVIER, M. N. *Avaliação de danos radioinduzidos devido à exposição aos radionuclídeos ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K através de sistemas bioindicadores*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Medicina, Belo Horizonte, 2018.
- [106] SANTOS, A. C. L. *Gamaespectrometria aplicada ao estudo de áreas agrícolas*. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 2007.
- [107] KETCHAM, R. A. “An improved method for determination of heat production with gamma-ray scintillation spectrometry”, *Chemical Geology*, v. 130, n. 3-4, pp. 175–194, 1996.
- [108] Dixit, S. K. (Ed.). *The Routledge Handbook of Consumer Behaviour in Hospitality and Tourism*. London, Routledge, 2017. ISBN: 9781138961671.
- [109] EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. “Natural radioactivity in food”. Disponível em: <https://www.epa.gov/radtown/natural-radioactivity-food>, 2025. Acesso em: 30 set. 2025.
- [110] IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Natural and induced radioactivity in food*. Relatório Técnico IAEA-TECDOC-1287, IAEA, Vienna, 2002.
- [111] CINELLI, G., ET AL. *European Atlas of Natural Radiation*. Relatório técnico, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019. Acesso em: 09 out. 2022.

- [112] AL-KHAROUF, S. J., AL-HAMARNEH, I. F., DABABNEH, M. “Natural radioactivity, dose assessment and uranium uptake by agricultural crops at Khan Al-Zabeeb, Jordan”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 99, n. 7, pp. 1192–1199, 2008.
- [113] TOME, F. V., RODRÍGUEZ, M. B., LOZANO, J. C. “Soil-to-plant transfer factors for natural radionuclides and stable elements in a Mediterranean area”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 65, n. 2, pp. 161–175, 2003.
- [114] FORKAPIC, S., VASIN, J., BIKIT, I., et al. “Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 166, pp. 104–111, 2017.
- [115] ABOJASSIM, A. A., DOSH, R. J., ABDULZAHAR, A. K. “Radioactivity in soil”, *Current Research in Soil Science*, v. 89, pp. 150–166, 2022.
- [116] SANTOS, H. G. D., ET AL. *Sistema brasileiro de classificação de solos*, v. 3. 3 ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2013.
- [117] SANTOS, A. K. G., OTHERS. *Aplicação de redes neurais artificiais para a previsão de valores do fator de transferência solo-planta para ^{137}Cs* . Tese de Mestrado, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2016.
- [118] UNIVERSITY OF HAWAII. “Soil Nutrient Management for Maui County – Soil Composition”. Disponível em: <https://cms.ctahr.hawaii.edu/Soil>, 2025. Acesso em: 22 set. 2025.
- [119] FONTANA, A. *Caracterização química e espectroscópica da matéria orgânica em solos do Brasil*. Tese de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.
- [120] BETTIOL, W., SILVA, C. A., CERRI, C. E. P., et al. *Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical*. Brasília, DF, Embrapa, 2023. ISBN: 978-65-89957-66-9.
- [121] OLIVEIRA, K. A. P. D. *Fator de transferência de elementos terras raras em solos tropicais tratados com fosfogesso*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- [122] MAKKI, A. A., HAJJAR, D., BAGAIS, O., et al. “Soil-to-plant transfer factor of natural radionuclides and associated health risk in some vegetable species in arid area”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 333, n. 8, pp. 3947–3954, 2024.

- [123] MORTVEDT, J. J. “Plant and soil relationships of uranium and thorium decay series radionuclides—a review”, *Journal of Environmental Quality*, v. 23, n. 4, pp. 643–650, 1994.
- [124] FRISSEL, M. J., KOSTER, J. “The IUR Project on Soil-To-Plant Transfer Factors of Radionuclides Expected Values and Uncertainties”. In: Desmet, G. (Ed.), *Reliability of Radioactive Transfer Models*, Springer, pp. 17–31, Dordrecht, 1988. doi: 10.1007/978-94-009-1369-1_17.
- [125] AGGARWAL, L. “Biological effects of ionizing radiation”, *Shodh Prerak*, v. 4, n. 1, pp. 342–348, 2014.
- [126] ELGAZZAR, A. H., KAZEM, N. “Biological effects of ionizing radiation”. In: Elgazzar, A. H. (Ed.), *The Pathophysiologic Basis of Nuclear Medicine*, Springer, pp. 715–726, Cham, 2015.
- [127] TAUHATA, L. *Fundamentos de proteção radiológica*. 2 ed. Rio de Janeiro, Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD/CNEN, 2014. ISBN: 9788589780380.
- [128] CATANOSO, M. F. *Desenvolvimento de método para controle de qualidade de geradores de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ utilizados em medicina nuclear*. Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP, São Paulo, 2011.
- [129] KHANDAKER, M. U. “High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry”, *International Journal of Fundamental Physical Sciences*, v. 1, n. 2, pp. 42–46, 2011.
- [130] DOKANIA, N., SINGH, V., MATHIMALAR, S., et al. “Characterization and modeling of a low background HPGe detector”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, v. 745, pp. 119–127, 2014.
- [131] FERREIRA, K. C. *Determinação das doses efetivas de alimentos, água e solo na região do CAUB-I através da espectrometria de raios gama*. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade Gama, Brasília, DF, 2018.
- [132] JÚNIOR, J. A. S., ET AL. “Estudo comparativo entre os detectores HPGe e NaIbb-Tl na determinação de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K em amostras de solo”, *Scientia Plena*, v. 5, n. 4, 2009.
- [133] MEDHAT, M. E., WANG, Y. “Estimation of background spectrum in a shielded HPGe detector using Monte Carlo simulations”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 84, pp. 13–18, 2014.

- [134] WALLBRINK, P. J., WALLING, D. E., HE, Q. “Radionuclide measurement using HPGe gamma spectrometry”. In: *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*, Springer Netherlands, pp. 67–96, Dordrecht, 2002.
- [135] GILMORE, G. R. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2 ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2008.
- [136] SILVA, R. C. *Fator de Transferência de Radionuclídeos e de Metais em Processos de Infusão de Ervas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.
- [137] CANBERRA INDUSTRIES. *Genie 2000 Spectroscopy Software Operations Manual*. Meriden, CT, 2006.
- [138] LEWICKA, S., PIOTROWSKA, B., ŁUKASZEK-CHMIELEWSKA, A., et al. “Assessment of natural radioactivity in cements used as building materials in Poland”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 18, pp. 11695, 2022. doi: 10.3390/ijerph191811695. Disponível em: <Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811695>>.
- [139] GARCÊZ, R. W. D. *Determinação das atividades específicas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K em amostras de fertilizantes minerais*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, February 2016. Disponível em: <Disponível em: <https://www.nuclear.ufrj.br/images/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Ricardo-Washington-Dutra-Garc%C3%A7a.pdf>>.
- [140] KAMINSKI, S., JAKOBI, A., WILHELM, C. “Uncertainty of gamma-ray spectrometry measurement of environmental samples due to uncertainties in matrix composition, density and sample geometry”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 94, pp. 306–313, 2014.
- [141] ABA, A., ISMAEEL, A., AL-BOLOUSHI, O. “Estimation of radiostrontium, radiocesium and radiobarium transfer from arid soil to plant: A case study from Kuwait”, *Nuclear Engineering and Technology*, v. 53, n. 3, pp. 960–966, 2021.
- [142] GUILLÉN, D. S. D. A., RAMOS, M. L. O., FARIAS, E. E. G., et al. “Radionuclídeos naturais em solos da Região Metropolitana do Recife”. In: *Anais do*

- II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (CoBI-CET)*, pp. 1–10, São Luís, MA, Brasil, 2018. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/352845212_Radionuclideos_naturais_em_solos_da_Regiao_Metropolitana_do_Recife>. Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [143] OLADELE, B. B., OTHERS. “Gamma spectroscopy study of soil-plant transfer factor characteristics of ^{40}K , ^{232}Th and ^{226}Ra in some crops cultivated in southwestern region of Nigeria”, *Heliyon*, v. 9, n. 9, 2023.
- [144] ELIUD, E. M., ET AL. “Soil to plant transfer factors of natural radionuclides in khat (*catha endulis*) from Igembe south Subcounty, Kenya”, *International Journal of Engineering and Applied Physics*, v. 4, n. 1, pp. 901–908, 2023.
- [145] RAJ, P., ALMAKRANI, M., FOULON, F., et al. “Field-based soil-plant uptake measurements of natural radionuclides for key vegetables and ghaf leaves in Abu Dhabi”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 276, pp. 107415, 2024.
- [146] CUNHA, H. V. F. “A diferença entre Atividade de Água (Aw) e o Teor de Umidade nos alimentos”. Disponível em: https://tecnal.com.br/pt-BR/blog/440_teor_de_umidade_vs_atividade_de_agua_entenda_as_diferencas_nos_alimentos, 2016. Acesso em: 16 mar. 2024.
- [147] PASTORINI, L. H., BACARIN, M. A., ABREU, C. M. “Secagem de material vegetal em forno de microondas para determinação de matéria seca e análises químicas”, *Ciência Agrotécnica*, v. 26, pp. 1252–1258, 2002.
- [148] SOUZA, G. B. D., NOGUEIRA, A. R. D. A., RASSINI, J. B. *Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico*. Relatório Técnico 33, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP, 2002. Acesso em: 06 ago. 2025.
- [149] AL-OU DAT, M., AL ATTAR, L., OTHMAN, I. “Transfer factor of ^{137}Cs and ^{90}Sr to various crops in semi-arid environment”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 228, pp. 106525, 2021.
- [150] ROSA, M. M. L. *Estudo de dieta total aplicado na avaliação de ingestão de elementos essenciais, tóxicos e radionuclídeos naturais nas populações urbana e rural de Poços de Caldas*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Acesso em: 05 jan. 2024.

- [151] MIRELES, F., QUIRINO, L., DÁVILA, I., et al. “Determinación de la Eficiencia de Detección de un Detector HPGe Mediante el Código de Simulación MCNP”. In: *Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR*, Cancún, México, 2004.
- [152] LOPES, J. M. *Dose efetiva comprometida devido aos radionuclídeos K-40, Ra-226, Ra-228 e Th-228 contidos nos alimentos da dieta da população do estado do Rio de Janeiro*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [153] SILVA, A. A. D. *Avaliação radiométrica em água subterrânea consumida pela população em municípios das mesorregiões da Borborema, Central Potiguar e Sertão Paraibano*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2018.
- [154] DOS SANTOS, N. R., DOMINGUES, A. M., DA SILVA, A. X., et al. “Determinação de curvas de eficiência para análise de presença de radionuclídeos em frutas orgânicas através de espectroscopia gama utilizando detector HPGe”. Apresentado em evento técnico, disponível em ResearchGate, 2022. Disponível em: <Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Edmilson-Souza-5/publication/366554487_DETERMINACAO_DE_CURVAS_DE_EFICIENCIA_PARA_ANALISE_DE_PRESENCA_DE_RADIONUCLIDEOS_EM_FRUTAS_ORGANICAS_ATRAVES_DE_ESPECTROSCOPIA_GAMA_UTILIZANDO_DETECTOR_HPGe/links/6537ec621d6e8a70704c883c/DETERMINACAO-DE-CURVAS-DE-EFICIENCIA-PARA-ANALISE-DE-PRESENCA-DE-RADIONUCLIDEOS.pdf>.
- [155] GARCÊZ, R. W. D., ET AL. “Study of K-40, Ra-226, Ra-228 and Ra-224 activity concentrations in some seasoning and nuts obtained in Rio de Janeiro city, Brazil”, *Food Science and Technology*, v. 39, n. 1, pp. 120–126, 2018.
- [156] BÉ, M. M., CHECHEV, V. P. “Recommended standards for gamma ray intensities”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, v. 728, pp. 157–172, 2013.
- [157] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 11929:2010 — Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation — Fundamentals and application*. Relatório técnico, ISO, Geneva, 2010. Norma Técnica.

- [158] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10703:2007 — Water quality — Determination of the activity concentration of radionuclides — Method by high resolution gamma-ray spectrometry*. Relatório técnico, ISO, Geneva, 2007. Norma Técnica.
- [159] UMISEDIO, N. K. *Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2007.
- [160] ROUT, S., YADAV, S., PULHANI, V. “Transfer of radionuclides from soil to selected tropical plants of Indian Subcontinent: A review”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021.
- [161] DE OLIVEIRA, A. P., ET AL. “Produtividade máxima e econômica do inhame em função de doses de potássio”, *Revista Caatinga*, v. 26, n. 3, pp. 110–115, 2013.
- [162] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation*. N. 419, IAEA Technical Reports Series. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2010. ISBN: 978-92-0-113009-9. Disponível em: <Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS419_web.pdf>.
- [163] PAIVA, A. K. S., OTHERS. “Intake of natural radionuclides present in organic and conventional foods: radiological aspects”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 331, n. 2, pp. 903–911, 2022.
- [164] PRIHART, H., OTHERS. “Radionuclide Activity Concentrations in Food and Drinking Water”. In: *IAEA-TECDOC-1788: Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water*, pp. 45–52, Vienna, 2016. International Atomic Energy Agency. Disponível em: <Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1788_web.pdf>. Available online.
- [165] AL-HAMZAWI, A. A. “Natural Radioactivity Measurements in Vegetables at Al-Diwaniyah Governorate, Iraq and Evaluation of Radiological Hazard”, *Al-Nahrain Journal of Science*, v. 20, n. 1, pp. 1315–1322, 2017. Disponível em: <Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/37p6pfb17zdnbp2wocgjakebky>>. Accessed via Internet Archive.
- [166] KANDIC, A., NIKEZIC, M., TODOROVIC, D. “Natural radioactivity in foodstuffs produced in Serbia”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 189,

- n. 3, pp. 300–307, 2020. doi: 10.1093/rpd/ncaa055. Disponível em: <Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa055>>.
- [167] ADJIRACKOR, T., DARKO, E. O., SAM, F. “Naturally occurring radionuclide transfer from soil to vegetables in some farmlands in Ghana and statistical analysis”, *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, v. 8, n. 2, pp. 1617–1626, 2017. Disponível em: <Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316450054_Naturally_occurring_radionuclide_transfer_from_soil_to_vegetables_in_some_farmlands_in_Ghana_and_statistical_analysis>. Available via ResearchGate.
- [168] PIETRZAK-FLIS, Z., CHRZANOWSKI, E., DEMBINSKA, S. “Intake of ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po with food in Poland”, *Science of The Total Environment*, v. 203, n. 2, pp. 157–165, 1997. doi: 10.1016/S0048-9697(97)00144-7. Disponível em: <Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00144-7)>.
- [169] VELASCO, H., ET AL. “Variability of ^{137}Cs and ^{40}K soil-to-fruit transfer factor in tropical lemon trees during the fruit development period”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 104, pp. 64–70, 2012.
- [170] COUNCIL, N. R. *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*. Washington, DC, National Academies Press, 1999. ISBN: 9780309062928. Disponível em: <Disponível em: <https://doi.org/10.17226/6459>>.
- [171] POWELL, B. A., MILLER, T., KAPLAN, D. I. “Radium and Strontium Sorption to Sandy Loam Soils”, *Journal of the South Carolina Academy of Science*, v. 13, n. 1, pp. Article 4, 2015. Disponível em: <Disponível em: <https://scholarcommons.sc.edu/jscas/vol13/iss1/4/>>.
- [172] GOMES, M. E. A. “Análise da influência das precipitações no cultivo do abacaxi no município de Monte Alegre de Minas – MG”. 2023.
- [173] DE OLIVEIRA, L. P., ET AL. “Estudo da necessidade hídrica do abacaxi no contexto climático de Tarauacá, Acre”, *Research, Society and Development*, v. 14, n. 1, pp. e9214148095–e9214148095, 2025.
- [174] VIANA, A. G. *Avaliação do potencial de mobilidade do ^{90}Sr em solos brasileiros*. Tese de Mestrado, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, CNEN, Rio de Janeiro, 2007.

- [175] HAQUE, M., FERDOUS, M. J. “Transfer of natural radionuclides from soil to plants in Savar Dhaka”, *Spanish Journal of Soil Science*, v. 7, n. 2, pp. 104–113, 2017. Disponível em: <Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318899266_Transfer_of_natural_radionuclides_from_soil_to_plants_in_Savar_Dhaka_Spanish_Journal_of_Soil_Science_SJSS>. Accessed November 2025.
- [176] PEIXOTO, C. M., HENKES, J. A. “Avaliação do uso do rejeito gerado pelo beneficiamento da Rocha Fosfatada na Agricultura”, *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 1, n. 1, pp. 74–122, 2012.
- [177] OLIVEIRA, L. P. D., VIEIRA, J. J., SOUZA, E. M. D., et al. “Estudo da necessidade hídrica do abacaxi no contexto climático de Tarauacá, Acre”, *Research, Society and Development*, v. 14, n. 1, pp. e48095, 2024.
- [178] HASAN, M. “Radionuclide Uptake by Plants: Influence of Physiological and Environmental Factors”. In: *Radionuclide Contamination and Remediation Through Plants*, Springer, pp. 45–68, Berlin, 2010. Capítulo de livro editado por Gupta, D. K. e Walther, C.
- [179] WASSERMAN, M. A., PÉREZ, D. V., BOURG, A. C. M. “Behavior of cesium-137 in some Brazilian oxisols”, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 33, n. 7-8, pp. 1335–1349, 2002.
- [180] ROCHA, E. A. *Avaliação da taxa de dose devido aos granitos ornamentais em ambientes públicos e privados na cidade do Recife – Pernambuco – Brasil*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- [181] PINHEIRO, R. D. B., ET AL. *Avaliação do nível de radioatividade natural da região da futura APA Municipal Ilha Verde, Muriqui, Mangaratiba-RJ*. Tese de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro Biomédico, Rio de Janeiro, 2025.

Apêndice A – Questionário aplicado

Informações sobre produtos produzidos e comercializados na Feira de Orgânicos da AGROPRACTA/Campo Grande-RJ

06/03/2022

Nome:

Contato:

Questionário

1. Quantos sítios há na região?
2. Qual o nome do sítio que a senhora/senhor cultivam?
3. O que é produzido no seu sítio? *

3. Produtos	4. Comercializado o ano todo		5. Período de comercialização											
	Sim	Não	Jan()	Fev()	Mar()	Abr()	Mai()	Jun()	Jul()	Ago()	Set()	Out()	Nov()	Dez()

4. Destes produtos, tem algum que seja comercializado durante todo o ano?
5. Em quais meses são comercializados os seus produtos?
6. Nos meses em que este(s) produtos não estão disponíveis aqui (PEPB), vocês adquirem de outro local? Se sim, qual?
7. Há comercialização direta com os produtores? Se sim, haveria permissão para coleta de amostras de solo?

Figura 1: Questionário aplicado aos agricultores