

PADRÕES DE CONCENTRAÇÕES, MAPEAMENTO E ESTIMATIVA DE DOSE  
DE RADIONUCLÍDEOS NATURAIS EM SOLOS DO ESTADO DE ALAGOAS E  
DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE  $^{137}\text{Cs}$

Rogério de Andrade Filgueiras

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: Ademir Xavier da Silva  
Fernando Carlos Araújo Ribeiro

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

PADRÕES DE CONCENTRAÇÕES, MAPEAMENTO E ESTIMATIVA DE DOSE  
DE RADIONUCLÍDEOS NATURAIS EM SOLOS DO ESTADO DE ALAGOAS E  
DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE  $^{137}\text{Cs}$

Rogério de Andrade Filgueiras

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

Examinada por:

---

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

---

Dr. Fernando Carlos Araújo Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Delson Braz, D.Sc.

---

Dr<sup>a</sup>. Dejanira da Costa Lauria, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Helena Polivanov, D.Sc.

---

Prof. Wagner de Souza Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

Filgueiras, Rogério de Andrade

Padrões de Concentrações, Mapeamento e Estimativa de Dose de Radionuclídeos Naturais em Solos do Estado de Alagoas e Distribuição da Concentração de  $^{137}\text{Cs}$  / Rogério de Andrade Filgueiras. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019

XV, 128 p.: il.; 29,7cm

Orientadores: Ademir Xavier da Silva

Fernando Carlos Araújo Ribeiro

Tese (Doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 120-128

1. Radionuclídeos em Solos. 2. Alagoas. 3. Detecção de Radiação Gama. I. Silva, Ademir Xavier da. *et al* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

"Dedico esta tese de doutorado aos meus pais,  
Osmar (*in memoriam*) e Laís, a minha  
filha Ana Clara e a minha esposa Deised".

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, que me proporcionou os meios para realizar esse trabalho.

Agradeço a minha família, pela paciência e compreensão de todo o tempo dedicado a esse trabalho.

Agradeço imensamente ao professor Ademir pela orientação e confiança no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço enormemente ao Dr. Fernando Ribeiro pela orientação e disponibilidade durante a realização dos trabalhos, assim como agradeço ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria / CNEN pela disponibilização dos laboratórios e equipamentos, além dos cursos já realizados, que também acrescentaram muito a minha formação.

Agradeço a Dra. Dejanira pelas suas observações que muito contribuíram para o presente trabalho, assim como todos os membros da Banca do Exame de Qualificação que auxiliaram de maneira muito importante para o aprimoramento e precisão do trabalho.

Agradeço ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pela coleta das amostras realizada, de forma tão bem planejada, sem as quais esse trabalho não seria possível.

Aos colegas do Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional (LAASC) em especial José Marques Lopes e Ricardo Gracês, que tão bem me receberam no LAASC. Agradeço também aos colegas Alessandro Carmo, Alessandro Domingues, Fernando Marzulo, Carlos Pastrana, Jardel, Leandro e Mirta, por todas as ideias trocadas, por todas as iniciativas (exitosas ou não) e conquistas ao longo do desenvolvimento desse trabalho. Agradeço também aos demais colegas do LAASC.

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

PADRÕES DE CONCENTRAÇÕES, MAPEAMENTO E ESTIMATIVA DE DOSE DE RADIONUCLÍDEOS NATURAIS EM SOLOS DO ESTADO DE ALAGOAS E DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE  $^{137}\text{Cs}$

Rogério de Andrade Filgueiras

Fevereiro/2019

Orientadores: Ademir Xavier da Silva

Fernando Carlos Araújo Ribeiro

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho tem como objetivo fornecer informações úteis para estudos geológicos e epidemiológicos no Brasil por meio do conhecimento das concentrações de radionuclídeos em solos. Esses trabalhos são escassos, principalmente na região Nordeste, onde podem existir áreas com anomalias radioativas ainda não conhecidas. Além disso, na área ambiental, o presente trabalho contribui para construir um banco de dados nacional a ser utilizado, entre outros propósitos, para avaliar alterações nas concentrações de radionuclídeos em solos devido a atividades humanas. Ou seja, este estudo objetivou conhecer a ocorrência dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{Cs}$  em solos do Estado de Alagoas. A concentração variou de  $(6 \pm 1) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(2160 \pm 81) \text{ Bq kg}^{-1}$  para  $^{40}\text{K}$  (média de  $630 \pm 25 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), de  $(5,0 \pm 0,4) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(63 \pm 2) \text{ Bq kg}^{-1}$  para  $^{226}\text{Ra}$  (média de  $28 \pm 1 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) e de  $(9,5 \pm 0,5) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(157 \pm 5) \text{ Bq kg}^{-1}$  para  $^{228}\text{Ra}$  (média de  $54 \pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ ). Enquanto a concentração média para  $^{226}\text{Ra}$  se aproxima da média mundial, o valor médio encontrado para  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  estão acima da média mundial. As medidas de  $^{40}\text{K}$  no sertão alagoano mostram uma alta concentração deste radionuclídeo. As concentrações de  $^{137}\text{Cs}$  variaram de  $(0,30 \pm 0,08) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(1,13 \pm 0,46) \text{ Bq kg}^{-1}$ , valores condizentes com a literatura para o Brasil.

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

PATTERNS OF CONCENTRATION, MAPPING AND DOSE ESTIMATION OF  
NATURAL RADIONUCLIDE IN SOILS OF THE STATE OF ALAGOAS AND  
CONCENTRATION DISTRIBUTION OF  $^{137}\text{Cs}$

Rogério de Andrade Filgueiras

February/2019

Advisors: Ademir Xavier da Silva

Fernando Carlos Araújo Ribeiro

Department: Nuclear Engineering

This work provides useful information for geological and epidemiological studies in Brazil, through the knowledge of the concentration of radionuclides in soils. These works are scarce, mainly in the Northeast region, where may be areas of unknown radioactive anomalies. In addition, in the environmental area, the present work contributes to build a national database to be used, among other purposes, to evaluate changes in radionuclide concentrations in soils due to human activities. In other words, this study aimed at knowing the occurrence of radionuclides  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in soils in the State of Alagoas. Concentration ranged from  $(6 \pm 1) \text{ Bq kg}^{-1}$  to  $(2160 \pm 81) \text{ Bq kg}^{-1}$  for  $^{40}\text{K}$  (average of  $630 \pm 25 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), from  $(5.0 \pm 0.4) \text{ Bq kg}^{-1}$  to  $(63 \pm 2) \text{ Bq kg}^{-1}$  for  $^{226}\text{Ra}$  (average of  $28 \pm 1 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) and from  $(9.5 \pm 0.5) \text{ Bq kg}^{-1}$  to  $(157 \pm 5) \text{ Bq kg}^{-1}$  for  $^{228}\text{Ra}$  (average of  $54 \pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ ). While the average concentration for  $^{226}\text{Ra}$  agrees with the worldwide average, the average values found for  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{40}\text{K}$  are above the worldwide average. The  $^{40}\text{K}$  measurements in the Alagoas backlands show a high concentration of this radionuclide. Concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  ranged from  $(0.30 \pm 0.08) \text{ Bq kg}^{-1}$  to  $(1,13 \pm 0,46) \text{ Bq kg}^{-1}$ , values consistent with the literature.

## Sumário

<b>Capítulo 1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Revisão de literatura .....	3
1.3 Apresentação do problema e justificativas .....	5
1.4 Objetivo .....	7
1.5 Objetivos específicos .....	7
<b>Capítulo 2 Fundamentação Teórica.....</b>	<b>9</b>
2.1 Radioatividade natural .....	9
2.1.1 Série Radioativa do $^{238}\text{U}$ .....	10
2.1.2 Série Radioativa do $^{232}\text{Th}$ .....	11
2.2 Rádio .....	12
2.3 Potássio .....	13
2.4 Césio .....	15
2.5 Solos.....	18
2.5.1 Definição .....	18
2.5.2 Formação dos solos .....	18
2.5.3 Horizontes pedogenéticos .....	20
2.5.4 Classificação de solos brasileira (EMBRAPA, 2006).....	22
2.5.5 Solos do Nordeste.....	24
2.6 O Estado de Alagoas.....	30
2.7 Espectrometria gama.....	42
2.8 Equilíbrio secular .....	45
2.9 PGAGEM Brasil .....	46
<b>Capítulo 3 Materiais e Métodos .....</b>	<b>48</b>
3.1 Local do estudo .....	48
3.2 Coleta das amostras .....	48
3.3 Preparação das amostras .....	49
3.4 Método analítico .....	50
3.5 Sistema de informação geográfica .....	51
3.6 Solos amostrados .....	52
3.7 Confeção dos mapas radiológicos.....	54



3.8 Análise estatística .....	54
<b>Capítulo 4 Resultados e Discussões.....</b>	<b>56</b>
4.1 Estatísticas descritivas .....	59
4.1.1 Resultados para o $^{40}\text{K}$ .....	59
4.1.2 Resultados para o $^{226}\text{Ra}$ .....	60
4.1.3 Resultados para o $^{228}\text{Ra}$ .....	61
4.1.4 Resultados para o $^{137}\text{Cs}$ .....	63
4.2 Comparação dos resultados com a literatura .....	65
4.2.1 Comparação da concentração do $^{40}\text{K}$ .....	65
4.2.2 Comparação da concentração do $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$ com a literatura.....	69
4.2.3 Comparação da concentração do $^{137}\text{Cs}$ .....	72
4.3 Agrupamento dos valores de concentração dos radionuclídeos naturais.....	73
4.4 Correlação entre as concentrações dos radionuclídeos naturais .....	77
4.4 Análise da concentração de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$ em relação aos tipos de solos.....	81
4.4.1 Análise estatística.....	81
4.4.2 Comparação da distribuição das concentrações nos diferentes tipos de solo	84
4.4.3. Valores de base em relação aos tipos de solos .....	87
4.5 Comparação da concentração entre as mesorregiões.....	92
4.6 Análise da deposição de $^{137}\text{Cs}$ .....	94
4.7 Mapas radiológicos do Estado de Alagoas .....	99
4.7.1 Potássio 40.....	100
4.7.2 Rádio 226 .....	102
4.7.3 Rádio 228 .....	105
4.8 Estimativa da dose externa .....	108
4.9 Avaliação do risco radiológico .....	112
<b>Capítulo 5 Conclusão .....</b>	<b>115</b>
5.1 Trabalhos Futuros .....	118
<b>Capítulo 6 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>120</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Contribuição da dose de radiação natural em seres humanos de acordo com a sua origem (adaptado de UNSCEAR, 2008).....	2
Figura 1.2 Estudos preliminares para a escolha da localização de possíveis reatores nucleares no Nordeste (MARIZ, 2011) .....	6
Figura 2.1 Dose individual média anual decorrente de fontes naturais (MAZZILLI; MÁDUA; PIRES DE CAMPOS, 2011) .....	9
Figura 2.2 Série de decaimento radioativo do $^{238}\text{U}$ (BOURDON, 2003).....	10
Figura 2.3 Série de decaimento radioativo do $^{232}\text{Th}$ (BOURDON, 2003) .....	11
Figura 2.4 Esquema de decaimento do $^{40}\text{K}$ (DALRYMPLE, G. BRENT; LANPHERE, 1969 <i>apud</i> PAIVA, 2008).....	14
Figura 2.5 Esquema de decaimento do $^{137}\text{Cs}$ (EMICO OKUNO; YOSHIMURA, 2010) .....	16
Figura 2.6 Perfil de distribuição da concentração de $^{137}\text{Cs}$ , em função da profundidade, em três áreas de Pernambuco (ANTUNES et al., 2010) .....	17
Figura 2.7 Processo de formação do solo (LEPSCH, 2002) .....	20
Figura 2.8 Horizontes típicos de um solo bem desenvolvido.....	21
Figura 2.9 Solos da Região Nordeste do Brasil (EMBRAPA, 2014).....	25
Figura 2.10 A figura da esquerda (a) mostra a região típica de ocorrência de Latossolos e a figura da direita (b) mostra o perfil típico desse solos (adaptado de EMBRAPA, 2014).....	26
Figura 2.11 Ao lado esquerdo (a) a figura mostra a região típica de desenvolvimento de perfil típico de um Neossolo e figura do lado direito (b) mostra o perfil típico de um Neossolo Litólico (adaptado de EMBRAPA, 2014) .....	27
Figura 2.12 Perfil típico de um Neossolo Regolítico (EMBRAPA, 2014) .....	28
Figura 2.13 A figura da esquerda (a) mostra a região típica de ocorrência de um Argissolo e a figura da direita (b) o perfil típico desse solo, adaptado de (EMBRAPA, 2014).....	29
Figura 2.14 A figura da esquerda (a) mostra a região típica de ocorrência de um Planossolo e a figura da direita (b) o perfil típico desse solo, adaptado de (EMBRAPA, 2014).....	30

Figura 2.15 Mesorregiões do Estado de Alagoas adaptado (IBGE, 2010 apud ALAGOAS, 2014).....	32
Figura 2.16 Solos do Estado de Alagoas (ALAGOAS, 2014) .....	33
Figura 2.17 Geomorfologia do Estado de Alagoas (ALAGOAS, 2014).....	35
Figura 2.18 Mapa de altitude do Estado de Alagoas (ALAGOAS, 2014) .....	37
Figura 2.19 Precipitação pluviométrica média anual (EMBRAPA, 2012b) .....	38
Figura 2.20 Projeção da população – 2016 (ALAGOAS, 2014).....	39
Figura 2.21 – População na área rural – 2010 (ALAGOAS, 2014) .....	40
Figura 2.22 Terras em estabelecimentos maiores que 100 ha (ALAGOAS, 2014) .....	40
Figura 2.23 Área ocupada por cana-de-açúcar em 2012 (ALAGOAS, 2014) .....	41
Figura 2.24 Produção de feijão (em toneladas) – 2012 (ALAGOAS, 2014) .....	41
Figura 2.25 Detector de HPGe (1) posicionado no interior da blindagem (5) com cavidade para inserção das amostras .....	44
Figura 2.26 Sistema de detecção gama com HPGe .....	44
Figura 3.1 Distribuição dos locais de coleta das amostras no Estado de Alagoas .....	49
Figura 3.2 Amostras de solos seladas .....	50
Figura 4.1 Histograma mostrando a distribuição de frequências de concentração de $^{40}\text{K}$ encontradas em todas as amostras do Estado de Alagoas .....	60
Figura 4.2 Histograma mostrando a distribuição de frequências de concentração de $^{226}\text{Ra}$ encontradas em todas as amostras de solo em estudo .....	61
Figura 4.3 Histograma mostrando a distribuição de frequências de concentração de $^{228}\text{Ra}$ encontradas em todas as amostras de solo em estudo .....	62
Figura 4.4 O diagrama <i>boxplot</i> com a variação de concentração de $^{137}\text{Cs}$ .....	64
Figura 4.5 Locais com as mais altas concentrações de $^{40}\text{K}$ reportados pela literatura na região Nordeste do Brasil .....	66
Figura 4.6 Dendrograma $^{40}\text{K}$ .....	74
Figura 4.7 Dendrograma $^{226}\text{Ra}$ .....	75
Figura 4.8 Dendrograma $^{228}\text{Ra}$ .....	76
Figura 4.9 Agrupamento da relação entre $^{228}\text{Ra}$ e $^{226}\text{Ra}$ .....	77
Figura 4.10 Correlação entre $^{228}\text{Ra}$ e $^{226}\text{Ra}$ para todas as amostras.....	78
Figura 4.11 Correlação entre $^{228}\text{Ra}$ , $^{226}\text{Ra}$ e $^{40}\text{K}$ para todas as amostras .....	78
Figura 4.12 Correlação entre a concentração de $^{228}\text{Ra}$ e $^{226}\text{Ra}$ para as amostras localizadas no sertão, no agreste e no leste do Estado de Alagoas.....	80

Figura 4.13 Correlação da concentração entre $^{226}\text{Ra}$ e $^{40}\text{K}$ para amostras do sertão, agreste e leste alagoano .....	80
Figura 4.14 Correlação da concentração entre $^{228}\text{Ra}$ e $^{40}\text{K}$ para amostras do sertão, agreste e leste alagoano. ....	81
Figura 4.15 <i>Boxplot</i> dos valores de concentração de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$ nos solos mais prevalentes no Estado de Alagoas .....	83
Figura 4.16 Distribuição da concentração de $^{40}\text{K}$ entre as mesorregiões do Estado de Alagoas .....	93
Figura 4.17 - Distribuição da concentração de $^{226}\text{Ra}$ entre as mesorregiões do Estado de Alagoas .....	93
Figura 4.18 Distribuição da concentração de $^{228}\text{Ra}$ entre as mesorregiões do Estado de Alagoas .....	94
Figura 4.19 Localização das amostras de $^{137}\text{Cs}$ com concentração acima da AMD .....	97
Figura 4.20 Esquema das chuvas orográficas no Nordeste (RAQSONU, 2011) .....	98
Figura 4.21 Local com $^{137}\text{Cs}$ detectado próximas as elevações do Estado de Alagoas, adaptado (ALAGOAS, 2014) .....	98
Figura 4.22 Concentração de $^{137}\text{Cs}$ em solos no Japão após o acidente nuclear de Fukushima .....	99
Figura 4.23 Distribuição da concentração de $^{40}\text{K}$ no Estado de Alagoas .....	101
Figura 4.24 Distribuição da concentração de $^{226}\text{Ra}$ no Estado de Alagoas .....	104
Figura 4.25 Distribuição da concentração de $^{228}\text{Ra}$ no Estado de Alagoas .....	107
Figura 4.26 Estimativa da taxa de dose externa no ar medida a um metro do solo no Estado de Alagoas .....	111

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Limites e médias de concentração de potássio total em rochas e solos e atividade de $^{40}\text{K}$ adaptado de (EISENBUD; GESELL, 1997; SANTOS JÚNIOR, 2009 <i>apud</i> RIBEIRO, 2016).....	15
Tabela 2.2 Nome das ordens dos solos segundo o SiBCS com os respectivos termos de conotação (JACOMINE, 2008) .....	23
Tabela 3.1 Comparação entre a quantidade de amostras por tipo de solo e a prevalência de solos no Estado de Alagoas .....	53
Tabela 4.1 Banco de dados com as concentrações dos radionuclídeos $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ e $^{137}\text{Cs}$ no Estado de Alagoas .....	58
Tabela 4.2 Valores de concentração de $^{137}\text{Cs}$ acima da AMD .....	63
Tabela 4.3 Resumo estatístico da concentração em Bq/kg dos radionuclídeos objeto de presente estudo .....	64
Tabela 4.4 Atividade de $^{40}\text{K}$ em várias regiões do Brasil adaptado de Ribeiro (2016). 67	
Tabela 4.5 Atividade específica de $^{40}\text{K}$ (em Bq/kg) medida em diversos países (UNSCEAR, 2008, <i>apud</i> Ribeiro, 2016).....	69
Tabela 4.6 Comparação da atividade específica de $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$ em várias regiões do Brasil e no mundo com o Estado de Alagoas, adaptado (RIBEIRO, 2016) .....	70
Tabela 4.7 Resultados dos testes estatísticos do $^{40}\text{K}$ para cada tipo de solo .....	84
Tabela 4.8 Resultados dos testes estatísticos do $^{226}\text{Ra}$ para cada tipo de solo .....	85
Tabela 4.9 Resultados dos testes estatísticos do $^{228}\text{Ra}$ para cada tipo de solo .....	86
Tabela 4.10 Estimativa dos valores de base para o $^{40}\text{K}$ para os solos de interesse .....	87
Tabela 4.11 Estimativa dos valores de base do $^{226}\text{Ra}$ para o Estado de Alagoas .....	88
Tabela 4.12 Estimativa valores de base do $^{228}\text{Ra}$ para os solos de interesse.....	89
Tabela 4.13 Estimativa dos valores de base de $^{137}\text{Cs}$ no Estado de Alagoas .....	90
Tabela 4.14 Estimativa dos valores de base para o Estado de Alagoas em Bq/kg para alguns tipos de solo .....	91
Tabela 4.15 Matriz de dados das amostras com concentração de $^{137}\text{Cs}$ acima da AMD	96
Tabela 4.16 Estatística descritiva da taxa de dose externa absorvida no ar no Estado de Alagoas .....	108
Tabela 4.17 - Estatística descritiva da dose equivalente efetiva anual no ar devido a exposição terrestre no Estado de Alagoas .....	109
Tabela 4.18 Avaliação do risco radiológico no leste, agreste e sertão .....	113

## Lista de Siglas

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
AEDE	Dose equivalente efetiva
AL	Estado de Alagoas
ALMERA	<i>Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity</i>
AMD	Atividade Mínima Detectável
BA	Estado da Bahia
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico Brasileiro
DIRAD	Divisão de Radioproteção Ambiental e Ocupacional
ELCR	Risco adicional de desenvolver câncer ao longo da vida
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HPGe	<i>high-purity germanium</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-MS	Espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LEG	Laboratório de Espectrometria Gama
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia de Radiação Ionizantes
LQP	Limite de quantificação praticável
MAPEP	<i>Mixed Analyze Performance Evaluation Program</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NORM	Materiais Radioativos de Ocorrência Natural
PE	Estado de Pernambuco
PGAGEM BRASIL	Projeto Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica
PNE	Plano Nacional de Energia
SE	Estado de Sergipe

SEPLAG	Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio de Alagoas
Shp	<i>Shapefile</i>
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TENORM	Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material
USDOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
VRQ	Valor de Referência de Qualidade

## Capítulo 1 **Introdução**

### **1.1 Considerações gerais**

A avaliação da concentração dos radionuclídeos no meio ambiente é fundamental para se conhecer os níveis de exposição dos seres humanos e animais à radiação. A interpretação das medidas de concentração de radionuclídeos em solos e suas respectivas doses tem como objetivo conhecer o nível de exposição de indivíduos ou de grupos críticos à radiação.

Para se avaliar o impacto ambiental da radioatividade é importante criar um banco de dados com informações a respeito dos radionuclídeos presentes nos diversos tipos de solos. Com este banco de dados, é possível desenhar mapas radiológicos, que podem fornecer informações úteis para exploração mineral, pesquisa geológica ou geofísica, além de subsidiar estudos epidemiológicos (LAUBENSTEIN *et al.*, 2013; UGUR *et al.*, 2012).

Existe grande variação da contribuição da dose natural de radiação em seres humanos, variado de acordo com a sua origem, de acordo com a localidade e entre indivíduos ou grupos de indivíduos. A Figura 1.1 mostra a estimativa da dose média mundial de radiação proveniente do meio ambiente. Nota-se que a fração de dose proveniente do meio terrestre é considerável (19,8%), soma-se a esse valor a contribuição do radônio (51,9%), que também é proveniente do meio terrestre. Além disso, os radionuclídeos presentes no meio terrestre também são transferidos para os alimentos. Dessa forma, o solo é um compartimento ambiental de suma importância para o estudo da radioatividade natural, pois, além de irradiar diretamente os seres humanos e a biota, o mesmo transfere radionuclídeos para água, plantas e animais, influenciando diretamente na fração da dose referente à ingestão.

Grande parte dos materiais utilizados atualmente na construção civil (granito, areia, cimento, etc.) são provenientes do meio terrestre e contribuem para a dose em seres humanos por meio da irradiação.

O radônio exalado pelo solo contribui de forma significativa com a dose devido à inalação desse radionuclídeo.



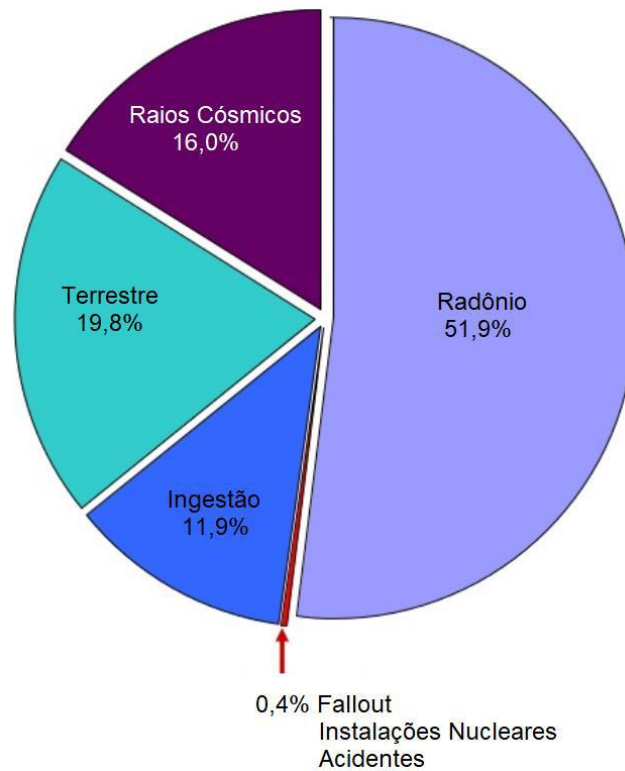


Figura 1.1 Contribui33o da dose de radia33o natural em seres humanos de acordo com a sua origem (adaptado de UNSCEAR, 2008)

A dose efetiva m3dia mundial devido a radioatividade natural 3 estimada em 2,4 mSv.a<sup>-1</sup> (faixa normal entre 1 e 13 mSv.a<sup>-1</sup>) ao n3vel do mar e corresponde a mais de 80% da dose total anual recebida pelos seres humanos. Aproximadamente 0,48 mSv.a<sup>-1</sup> (com faixa normal entre 0,3 e 1 mSv.a<sup>-1</sup>) se deve a radia33o terrestre (UNSCEAR, 2000, 2008).

O solo 3 constitu3do de alguns minerais que possuem na sua constitui33o elementos radiativos. Solos com alta concentra33o de ur3nio, t3rio e pot3ssio podem expor o ser humano a n3veis elevados de radia33o. Os radionucl3deos presentes no solo podem ser absorvidos pelas plantas e culturas destinadas ao consumo humano e animal. Atrav3s da ingest3o de alimentos estes radionucl3deos s3o incorporados ao organismo, produzindo dose interna de radia33o. Os radionucl3deos presentes nos solos e minerais s3o tamb3m encontrados na 3gua utilizada para consumo humano.

Considerando a dose externa de radia33o que o solo pode causar em seres vivos e tendo em vista que os solos e as rochas s3o um meio de transfer3ncia de radionucl3deos

de origem natural e artificial para os alimentos, água e ar, o seu estudo torna-se essencial para avaliar essas doses.

Os solos podem sofrer alterações devido a atividades antropogênicas aumentando a dose nos indivíduos para além da radiação natural. Atividades de mineração, extração de petróleo, geração de energia a partir de fontes geotérmicas, produção de fertilizantes, agricultura, indústria de cimento, *fallout*, entre outros, também podem modificar as concentrações de radionuclídeos de ocorrência natural. Essas atividades industriais podem produzir material radioativo de ocorrência natural, conhecidos como NORM, do inglês “*naturally occurring radioactive material*”. Outro termo muito comum na literatura é o TENORM, do inglês, “Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material”. Os radionuclídeos das séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ , além do  $^{40}\text{K}$ , geralmente encontram-se presentes nos materiais classificados como NORM e TENORM e o seu uso pode causar um incremento significativo na exposição da população, que não pode ser desprezado (MAZZILLI; MÁDUA; PIRES DE CAMPOS, 2011).

A concentração dos radionuclídeos nos solos varia muito de região para região. Logo é importante conhecer as concentrações dos radionuclídeos em solos para cada localidade.

## 1.2 Revisão de literatura

No Brasil, existem poucos trabalhos referentes ao mapeamento de grandes áreas para a concentração de radionuclídeos em solos. A maioria dos estudos realizados se concentram nos Estados da região Sudeste do País.

Para o Estado de São Paulo (PERES, 2007) foram propostos valores de referência de qualidade (VRQ), prevenção e intervenção para os seguintes radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e U-nat, os quais foram levantadas as atividades específicas (concentrações) por meio de espectrometria gama passiva em um detector de germânio hiperpuro. Foram coletadas 30 amostras de solos, dentre os tipos de solos mais representativos do Estado de São Paulo, na profundidade de 0 a 20 cm. As amostras foram medidas após um período mínimo de 30 dias, com o tempo de contagem das amostras variando de 90.000 a 220.000 segundos. Nesse trabalho, a atividade específica do  $^{40}\text{K}$  variou de 15,3 a 516 Bq/kg, tendo como média geométrica 86,7 Bq/kg; para o  $^{226}\text{Ra}$  a variação da atividade específica foi de 1,0 a 61,8 Bq/kg, tendo como média geométrica

17,1 Bq/kg e para o  $^{228}\text{Ra}$  variou de 3,3 a 97,6 Bq/kg, tendo com média geométrica 27,8 Bq/kg. Já a atividade específica do  $^{137}\text{Cs}$  variou de 0,8 a 4,1 Bq/kg, tendo média geométrica de 1,7 Bq/kg (PERES, 2007).

No Estado de Minas Gerais (PEIXOTO, 2013), foram estabelecidos os VRQ de U e Th Um total de 110 amostras de solo foram retiradas na profundidade de 0 a 20 cm, distribuídas pelo referido Estado. Os valores de atividade específica para o U variaram de 7,8 a 334,3 Bq/kg, com média de 84,81 Bq/kg; o Th teve atividade entre 8,1 a 184,0 Bq/kg, com média de 58,11 Bq/kg, sendo que os valores de referência de qualidade foram estipulados em 101,6 Bq/kg para o  $^{238}\text{U}$  e 75,7 para o  $^{232}\text{Th}$  (PEIXOTO, 2013). Nesse trabalho, para o cálculo do VRQ foi utilizado o terceiro quartil (percentil 75). Esse foi o primeiro estudo a buscar estabelecer uma correlação entre o tipo do solo e a concentração dos radionuclídeos no horizonte A. Entretanto, não foi encontrada uma correlação significativa entre as concentrações de atividade de U e Th para os tipos de solos estudados.

No Estado do Rio Janeiro (RIBEIRO, 2016), foi criado um banco de dados, dos radionuclídeos naturais  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  e do radionuclídeo artificial  $^{137}\text{Cs}$  em solos do referido Estado. Como o banco de dados, foram propostos valores de referência de qualidade (VRQ) para os radionuclídeos citados para o Estado do Rio de Janeiro. Além disso, buscou-se determinar fatores que influenciam as concentrações dos radionuclídeos nos solos fazendo relações com a pedologia, características geológicas e principais propriedades físicas e químicas dos solos. De forma pioneira, foram elaborados mapas de distribuição da concentração dos radionuclídeos estudados.

Foi realizada também a avaliação da dose externa que a população do Estado do Rio de Janeiro está exposta devido aos radionuclídeos presentes nos solos estudados. Neste trabalho, 263 amostras superficiais foram coletadas em solos na profundidade de 0 a 20 cm em áreas de mínimo impacto antrópico em todo o Estado, representando as principais classes de solos e tipos geológicos, A determinação da concentração dos radionuclídeos foi realizada por espectrometria gama. Os pontos das amostras foram identificados por meio da análise conjunta da posição georeferenciada das amostras com os mapas de solo, geologia, cobertura e uso dos solos do Estado do Rio de Janeiro, sendo os mapas em escala de 1:500.000. As concentrações dos radionuclídeos naturais ficaram dentro da faixa de valores reportadas como de ocorrência natural no mundo.

No Estado do Rio de Janeiro, a concentração de atividade variou entre 12 e 1029 Bq kg<sup>-1</sup> para <sup>40</sup>K (média geométrica 111 Bq kg<sup>-1</sup>), de 3,5 a 100 Bq kg<sup>-1</sup> para <sup>226</sup>Ra (média geométrica 30 Bq kg<sup>-1</sup>) e de 5,4 a 314 Bq kg<sup>-1</sup> para <sup>228</sup>Ra (média geométrica 67 Bq kg<sup>-1</sup>) (RIBEIRO, 2016). Solos de origem ígnea e metamórfica (Neossolo Litólico e Cambissolo) apresentaram as maiores concentrações, sendo as menores encontradas no Espodosolo, de origem sedimentar. As menores concentrações de <sup>226</sup>Ra foram observadas em solos ocorrendo sobre rocha com alto grau de metamorfismo (granulito).

### **1.3 Apresentação do problema e justificativas**

Atividades antropogênicas podem modificar a concentração dos radionuclídeos de origem natural presentes no solo ou introduzir radionuclídeos artificiais em determinados ambientes (GARCÊZ, 2016). O uso de fertilizantes pode contribuir para o aumento de radionuclídeos no solo. O uso de adubação fosfatada, por exemplo, no cultivo de cana-de-açúcar é comum, com objetivo de elevar a produtividade dos canaviais de solos pobres em fósforo. O cultivo da cana-de-açúcar em solos de tabuleiro (Podzólicos Amarelos) e morros (Latosolos Amarelos) de baixa fertilidade, exige adubações fosfatadas pesadas para garantir boas produtividades (RAMALHO, J. F. G. P., AMARAL SOBRINHO, N. M. B., VELLOSO, 1993). O adubo fosfatado dependendo da rocha fosfática utilizada para seu fabrico, pode conter elementos radioativos em sua composição (BECEGATO, 2015).

Além disso, atividades de mineração podem aumentar a concentração de radionuclídeos naturais no solo. Alguns minerais ao se formarem incorporam urânio e tório em proporções superiores à média da crosta terrestre (PEIXOTO, 2013). Assim, o ciclo de lavra e beneficiamento de minerais pode acarretar em contaminação do solo com radionuclídeos, sendo um tipo de indústria importante para a concentração de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM) no meio ambiente.

Além da contaminação de origem natural, os solos também estão suscetíveis a contaminação por radionuclídeos artificiais provenientes de *fallout*, por efluentes atmosféricos liberados por instalações nucleares e principalmente por acidentes e testes nucleares.

O Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030 – elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê a implantação de novos reatores nucleares no Nordeste.

Uma das cidades que pode receber a primeira usina nuclear do Nordeste é Itacuruba, no Estado de Pernambuco. Essa cidade está a aproximadamente 100 quilômetros de distância da divisa o Estado de Alagoas. Segundo a EPE, a cidade reúne as melhores condições para o empreendimento, pois conta com solo estável, oferta de água em abundância oriunda do Rio São Francisco (para resfriar os reatores) e localiza-se nas proximidades das linhas de transmissão da Chesf. Outras localidades às margens do Rio São Francisco também foram identificadas, inclusive no Estado de Alagoas, conforme mostrado na Figura 1.2.

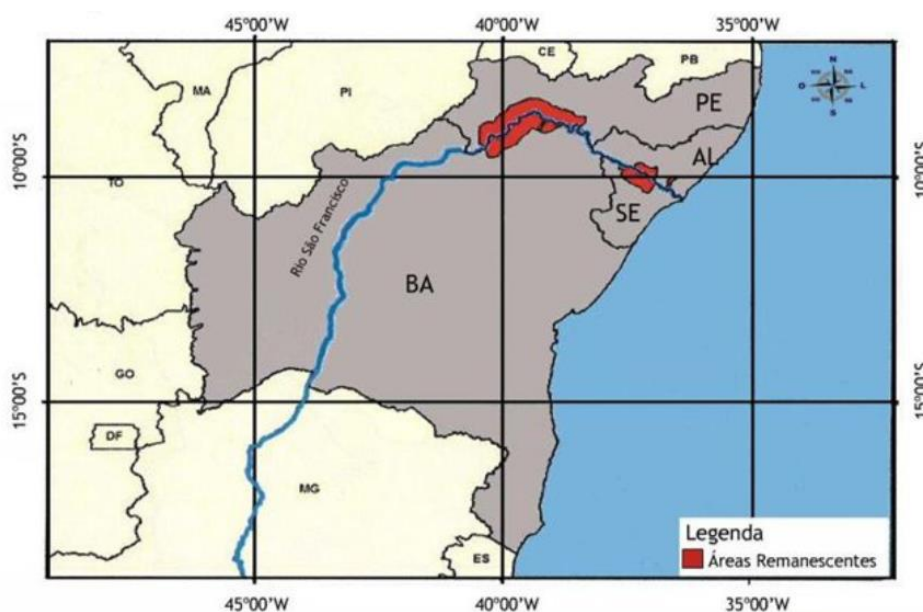


Figura 1.2 Estudos preliminares para a escolha da localização de possíveis reatores nucleares no Nordeste (MARIZ, 2011)

Dessa forma, considerando a possibilidade de instalação de reatores nucleares de potência em estados vizinhos, ou no próprio Estado de Alagoas, e principalmente a ausência de estudos sistematizados e abrangentes para o estabelecimento de valores de base de radionuclídeos em solos no Nordeste, Alagoas foi o Estado escolhido para o estudo.

Ao se conhecer as distribuições de concentrações dos radionuclídeos, pode-se comparar, em trabalhos futuros, os impactos de atividade antropogênicas (como o uso de fertilizante na agricultura) com outros usos do solo.

O padrão de concentração de radionuclídeos no solo auxilia também no licenciamento de instalações nucleares, uma vez que é possível conhecer os valores de base de radionuclídeos do solo antes da implantação de qualquer reator de potência próximo ou no próprio Estado.

As amostras do presente trabalho foram coletadas em diversos tipos de solos com maior ou menor atividade antrópica, principalmente em solos utilizados para atividades agrícolas intensivas e extensivas.

#### **1.4 Objetivo**

Tendo em vista os problemas apresentados, faz-se necessário conhecer as concentrações dos radionuclídeos naturais  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  e do radionuclídeo artificial  $^{137}\text{Cs}$  em solos do Estado de Alagoas e criar um banco de dados considerando a concentração dos mesmo e a sua localização. Dessa forma, é objetivo do presente trabalho prover informações úteis para a avaliação da qualidade radiológica ambiental, além de subsidiar o desenvolvimento de estratégias para o gerenciamento e proteção de solos no Estado de Alagoas.

Uma vez criado o banco de dados será possível estimar os padrões de concentração para radionuclídeos em diferentes tipos de solos do Estado de Alagoas. Esses valores são úteis para balizar atividades de monitoração radiológica ambiental. O levantamento dos níveis de radioatividade é de interesse não apenas para adquirir informações sobre radioatividade e construir um banco de dados nacional, mas também para contribuir com banco de dado mundial e estudos futuros na região (RIBEIRO, 2016).

Estudos epidemiológicos também podem ser subsidiados com o presente trabalho, contribuindo para uma recente área, a “geologia médica”, que é definida como a ciência que estuda a influência de fatores geológicos ambientais relacionados à distribuição geográfica das doenças humanas e dos animais (SELINUS, 2006).

#### **1.5 Objetivos específicos**

- 1) Conhecer as concentrações dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{C}$  nos solos e criar um banco de dados com a localização das amostras para todo o

Estado de Alagoas. Com o banco de dados, será realizada a estatística descritiva das concentrações das referidas amostras.

- 2) Realizar a comparação das concentrações de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{C}$  nos solos do Estado de Alagoas com valores reportados na literatura.
- 3) Agrupar as amostras pelos valores de concentrações a fim de determinar os fatores que podem influenciar nas concentrações dos radionuclídeos nos solos do Estado.
- 4) Correlacionar as concentrações de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  para todo o Estado e para as suas respectivas mesorregiões.
- 5) Analisar a concentração dos radionuclídeos em relação ao tipo de solo e mesorregião.
- 6) Calcular valores de base para os solos mais prevalentes no Estado de Alagoas.
- 7) Elaborar mapas radiológicos do Estado de Alagoas para os radionuclídeos naturais  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ , permitindo a visualização espacial das suas atividades específicas e a interpretação dos dados.
- 8) Estimar a dose externa da radiação de origem terrestre proveniente dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  a que a população do Estado de Alagoas está exposta e realizar o respectivo mapa de dose.
- 9) Realizar a avaliação do risco adicional de desenvolver câncer ao longo da vida em virtude dos radionuclídeos naturais presentes nos solos de Alagoas.

## Capítulo 2 **Fundamentação Teórica**

### **2.1 Radioatividade natural**

O homem e o meio ambiente sempre estiveram sujeitos à radiação ionizante, sendo continuamente expostos à radiação proveniente do espaço (radiação cósmica), dos radionuclídeos presentes no solo (radiação terrestre ou radionuclídeos primordiais) ou em alimentos, água e ar consumido pelo homem (MAZZILLI; MÁDUA; PIRES DE CAMPOS, 2011). A radiação natural é responsável por aproximadamente 80% da dose de radiação média anual e as aplicações médicas contribuem quase que totalmente para as doses de natureza artificial a que o ser humano está sujeito durante o ano (HEILBRON FILHO; LAVALLE, 2004).

O  $^{40}\text{K}$  juntamente com os filhos das séries radioativas do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  correspondem a maior fração da dose natural de origem terrestre recebida pelo homem e, por isso, são aqui estudados. A Figura 2.1 mostra a fração da dose anual média relacionada a esses radionuclídeos. O radônio por ter contribuição expressiva na dose é mostrado separadamente, entretendo, como será visto a seguir, o mesmo faz parte das séries radioativas do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ .

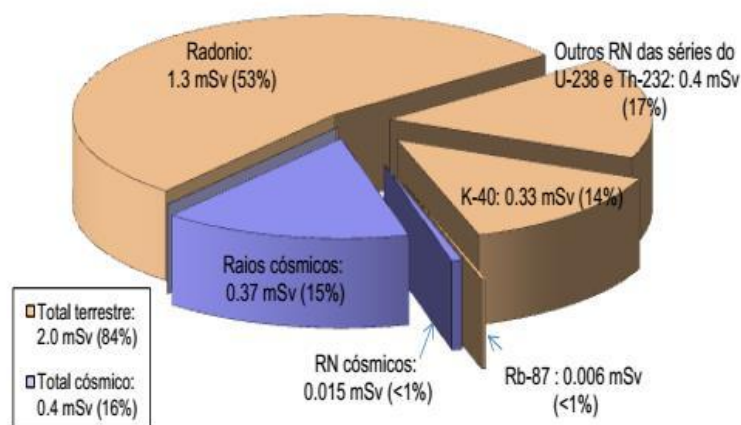


Figura 2.1 Dose individual média anual decorrente de fontes naturais (MAZZILLI; MÁDUA; PIRES DE CAMPOS, 2011)



Assim, as fontes de radiação terrestre mais importantes são o  $^{40}\text{K}$  e as duas séries de elementos radioativos que tem sua origem no decaimento do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . Outros radionuclídeos da série de decaimento do  $^{235}\text{U}$  têm pouca influência na exposição à radiação. A dose individual média anual decorrente de fontes naturais é estimada em 0,33mSv para o  $^{40}\text{K}$  e de 0,4 mSv para os demais radionuclídeos da série do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$  (MAZZILLI; MÁDUA; PIRES DE CAMPOS, 2011). Dessa forma, será aqui aprofundado e estudado as séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ .

### 2.1.1 Série Radioativa do $^{238}\text{U}$

A cadeia de  $^{238}\text{U}$  (também conhecida como série do rádio) decai em vários elementos como bismuto, chumbo, polônio, protactínio, rádio, radônio, tálio e tório. Todos estão presentes, pelo menos transitoriamente, em qualquer amostra contendo urânio natural. A energia total liberada a partir de  $^{238}\text{U}$  até o isótopo estável  $^{206}\text{Pb}$ , incluindo a energia perdida para neutrinos, é de aproximadamente 52 MeV. O  $^{238}\text{U}$  corresponde a 99,25% do urânio natural. A posição do  $^{226}\text{Ra}$  na cadeia está assinalada na Figura 2.2.

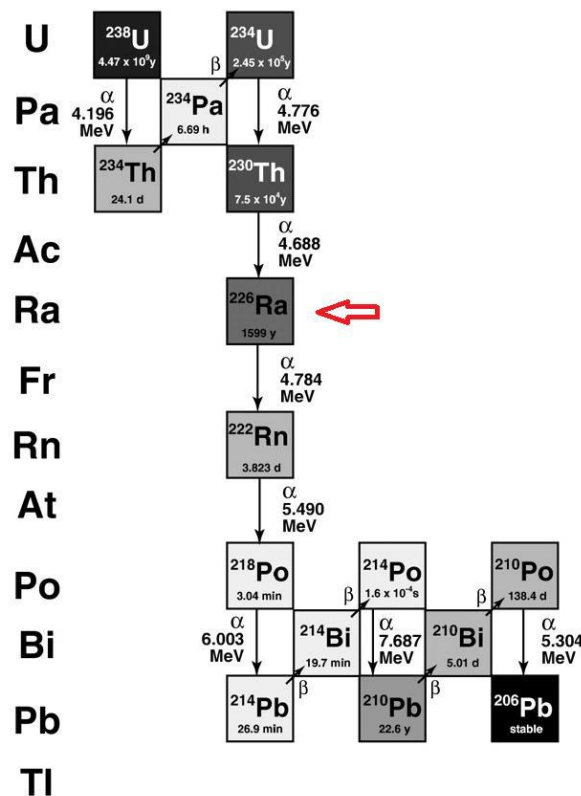


Figura 2.2 Série de decaimento radioativo do  $^{238}\text{U}$  (BOURDON, 2003)

O rádio pertence ao grupo dos metais alcalinos terrosos, sendo o isótopo  $^{226}\text{Ra}$  emissor de partículas alfa.

### 2.1.2 Série Radioativa do $^{232}\text{Th}$

Nesta série de decaimento (Figura 2.3) são encontrados os seguintes elementos: actínio, bismuto, chumbo, polônio, rádio, radônio e tálio. Esses elementos estão presentes, pelo menos transitoriamente, em qualquer amostra experimental contendo tório. A série termina com o isótopo estável  $^{208}\text{Pb}$ . A energia total liberada a partir de  $^{232}\text{Th}$  até o isótopo  $^{208}\text{Pb}$ , incluindo a energia perdida para neutrinos, é de aproximadamente 43 MeV.

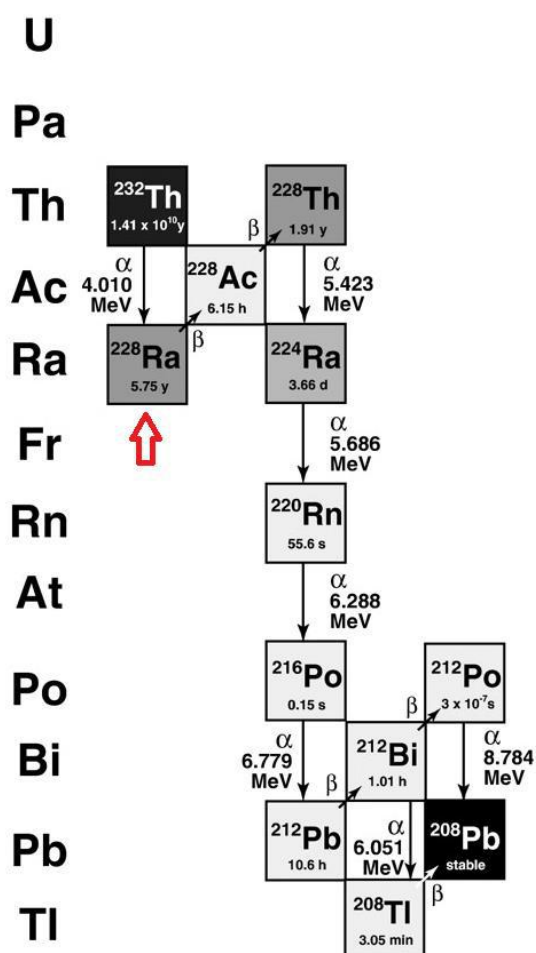


Figura 2.3 Série de decaimento radioativo do  $^{232}\text{Th}$  (BOURDON, 2003)

## 2.2 Rádío

O rádío é o elemento químico mais pesado do grupo dos metais alcalinos terrosos. Entretanto, o comportamento químico do rádío é similar ao do cálcio (ambos metais alcalinos terrosos), com raios atômicos relativamente próximos. Assim, as plantas podem absorver rádío no lugar do cálcio. Ambos isótopos de rádío ( $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ ) podem chegar ao homem pela ingestão de alimentos e água. No corpo humano, assim como o cálcio, cerca de 70 a 90% permanecem retido nos ossos, sendo o restante distribuído uniformemente nos tecidos moles ou excretado.

Do ponto de vista biológico e radiológico, o  $^{226}\text{Ra}$  é um dos radionuclídeos mais importantes da série do  $^{238}\text{U}$ . Nos solos, o equilíbrio secular radioativo não deve ser atingido mesmo num curto período de tempo devido à lixiviação preferencial do  $^{226}\text{Ra}$  em relação ao  $^{230}\text{Th}$  e ao  $^{238}\text{U}$ . Devido ao intemperismo, o  $^{226}\text{Ra}$  migra das rochas para o solo, sendo transportado como material particulado e depositado como silte ou sedimentos e sua fração solúvel pode migrar nas águas superficiais e se depositar no solo através de ações químicas ou biológicas (TAYLOR, 1964). Como um metal alcalino terroso, o rádío é o elemento químico de maior mobilidade da série de decaimento radioativo.

O  $^{226}\text{Ra}$  está presente em rochas e solos em quantidades variáveis. As rochas ígneas tendem a conter concentrações mais elevadas desse radionuclídeo do que as sedimentares (arenitos e calcários). Nas rochas esse radionuclídeo encontra-se geralmente em equilíbrio radioativo com o  $^{238}\text{U}$  (EISENBUD; GESELL, 1997).

Os isótopos  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  são importantes do ponto de vista da proteção radiológica pois possuem meias-vidas longas (1.622 e 5,7 anos, respectivamente), além disso geram radônio nas sequências das séries radioativas. No Brasil, geralmente os solos apresentam teores de tório superiores aos de urânio, logo na maioria das vezes são esperadas concentrações maiores de  $^{228}\text{Ra}$  em relação ao  $^{226}\text{Ra}$ .

O entendimento do comportamento do rádío em solos superficiais é de suma importância, pois costuma haver perdas para a atmosfera dos seus filhos, principalmente do radônio, que é um gás nobre, alterando assim a concentração dos produtos das cadeias de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ .

## 2.3 Potássio

O potássio é o sétimo elemento mais comum na crosta terrestre, estando largamente distribuído, mas devido a sua alta reatividade e afinidade com outros elementos nunca ocorre em sua forma elementar. Teores mais elevados de potássio são observados nos minerais evaporíticos e nos silicatos de potássio (MELO DE OLIVEIRA, 2008).

O potássio natural é composto por três isótopos:  $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{41}\text{K}$ , desses somente  $^{40}\text{K}$  é radioativo (SANTOS JUNIOR *et al.*, 2005). A abundância do isótopo  $^{39}\text{K}$  é 93,1% e a do  $^{41}\text{K}$  é de 6,9%. O isótopo de potássio radioativo ( $^{40}\text{K}$ ) possui abundância de somente 0,012%, porém mesmo representando uma pequena fração dos isótopos estáveis de potássio, o  $^{40}\text{K}$  é importante para a proteção radiológica, sendo responsável por cerca de 60% da dose efetiva total anual devido à ingestão (UNSCEAR, 2008). O  $^{40}\text{K}$  possui meia-vida longa de  $1,248 \times 10^9$  anos ou 1,26 bilhões de anos.

No corpo humano o  $^{40}\text{K}$  comporta-se como um nutriente essencial devido à semelhança com o potássio estável, sendo uniformemente distribuído nos tecidos musculares e sua concentração mantém-se constante devido o equilíbrio homeostático (LOPES, 2018).

O corpo de um ser humano de 70 kg contém aproximadamente 140 g de potássio, consequentemente a atividade do  $^{40}\text{K}$  correspondente é de 3.700 Bq, sendo responsável por um equivalente de dose anual no corpo humano de 0,17 mSv para adultos e de 0,19 mSv para crianças (UNSCEAR, 2000) e a maior contribuição no cálculo da dose é devido à radiação beta e não à radiação gama emitida.

O  $^{40}\text{K}$  possui os três tipos de decaimento beta, ou seja, aproximadamente 88% do tempo ele decai para o  $^{40}\text{Ca}$ , com emissão de partículas beta ( $\beta^-$ ), com um máximo de energia em 1,33 MeV e um antineutrino. Em aproximadamente 11% das vezes ele decai para o  $^{40}\text{Ar}$ , por captura eletrônica, com a emissão de 1.460 MeV de raios gama e um neutrino. Por outro lado, de forma rara, 0,001% decai no  $^{40}\text{Ar}$ , emitindo um pósitron ( $\beta^+$ ) e um neutrino, conforme o esquema de decaimento da Figura 2.4.

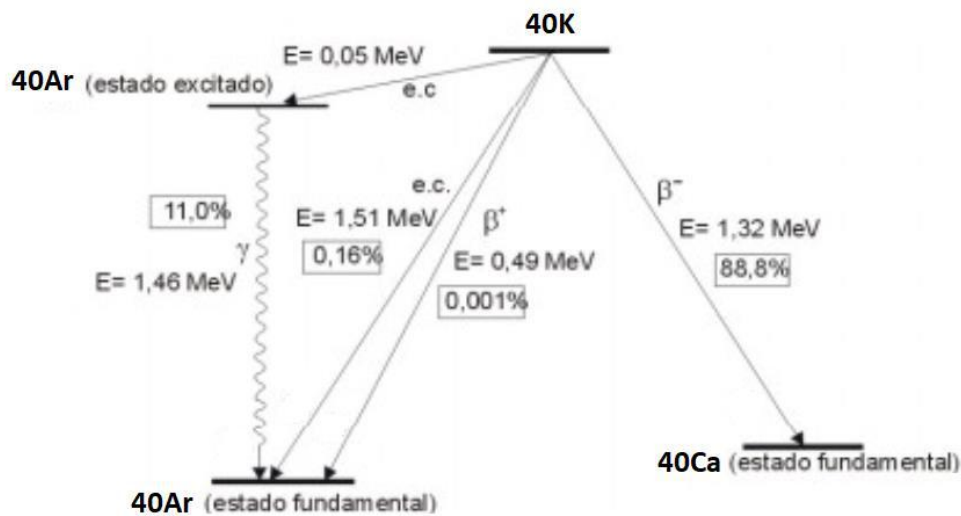


Figura 2.4 Esquema de decaimento do  $^{40}\text{K}$  (DALRYMPLE, G. BRENT; LANPHERE, 1969 *apud* PAIVA, 2008)

Para a associação do  $^{40}\text{K}$  com a formação geológica da localidade de estudo é importante saber que os silicatos ricos em potássio são o feldspato potássico, a moscovita e a leucita. Os principais compostos evaporíticos de potássio são: silvita (KCl), contendo 63% de  $\text{K}_2\text{O}$ ; carnalita ( $\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), contendo 17% de  $\text{K}_2\text{O}$ ; cainita ( $\text{KCl}\cdot\text{MgSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), contendo 19% de  $\text{K}_2\text{O}$ ; langbeinita ( $\text{K}_2\text{SO}_4\cdot 2\text{MgSO}_4$ ), contendo 23% de  $\text{K}_2\text{O}$  (MELO DE OLIVEIRA, 2008).

A concentração de K é mais baixa em rochas basálticas e areias do que em rochas graníticas, que geralmente contêm concentrações mais elevadas desse elementos (EISENBUD; GESELL, 1997; *apud* RIBEIRO, 2016). O feldspato potássico apresenta um teor máximo de  $^{40}\text{K}$  de 0,14%. Segue abaixo a Tabela 2.1 com a concentração de potássio em rochas e solos.

Tabela 2.1 Limites e médias de concentração de potássio total em rochas e solos e atividade do  $^{40}\text{K}$  adaptado de (EISENBUD; GESELL, 1997; SANTOS JÚNIOR, 2009 *apud* RIBEIRO, 2016)

Material	$K_{\text{total}}$ (%)	$^{40}\text{K}$ ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )
<sup>a</sup> Basalto	0,8	300
<sup>a</sup> Máfica	0,3 – 1,1	70 – 400
<sup>a</sup> Granito (média)	> 4	> 1000
<sup>b</sup> Xistos Arenosos (média)	2,7	800
<sup>b</sup> Carbonáticas (média)	0,3	70
<sup>b</sup> Todas as rochas	0,3 – 4,5	70 – 1500
Crosta continental (média)	2,8	850
Solo (média)	1,5	400

(a) Rochas ígneas; (b) Rochas Sedimentares

## 2.4 Césio

O césio é um elemento químico identificado pelo símbolo Cs, possui número atômico 55 e faz parte do grupo dos metais alcalinos. Seu isótopo estável é o  $^{133}\text{Cs}$ . Entre os isótopos radioativos, os mais conhecidos são os  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{137}\text{Cs}$ , que são produtos de fissão produzidos em reatores nucleares e presentes nos rejeitos, nos efluentes e em liberações acidentais (PIOCH, 1993).

Entre os radionuclídeos artificiais liberados, o  $^{137}\text{Cs}$  é um dos mais importantes (UNSCEAR, 1982). O  $^{137}\text{Cs}$  é um radionuclídeo artificial que é produzido através do processo de fissão do  $^{235}\text{U}$  e  $^{239}\text{Pu}$ . A dispersão de  $^{137}\text{Cs}$  no planeta acontece via *fallout*, advindos de testes nucleares, onde as partículas menores contendo  $^{137}\text{Cs}$  ficam suspensas por um longo período e costumam se depositar distante do local de liberação. Entretanto, a distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  pelo planeta não é uniforme, tendo aproximadamente 25% de todo o  $^{137}\text{Cs}$  liberado na atmosfera se depositado no hemisfério sul (UNSCEAR, 2008).

Considerando o decaimento radioativo, o  $^{137}\text{Cs}$  em 94,6% das vezes se transforma no  $^{137}\text{Ba}$  por meio de decaimento beta-menos, onde há liberação de aproximadamente 0,514MeV. A meia-vida desse decaimento é de aproximadamente 30 anos. O  $^{137}\text{Ba}$  permanece ainda num estado excitado por pouco mais de dois minutos e decai emitindo

um fóton gama de 0,662MeV. Há ainda a competição desse decaimento gama com o processo de conversão interna, apresentado pelo  $e^-$  na Figura 2.5 Esquema de decaimento do  $^{137}\text{Cs}$  (EMICO OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Por outro lado, há 5,4% de probabilidade do  $^{137}\text{Cs}$  decair por meio de um outro decaimento beta-menos diretamente para o estado fundamental, liberando 1,176MeV.

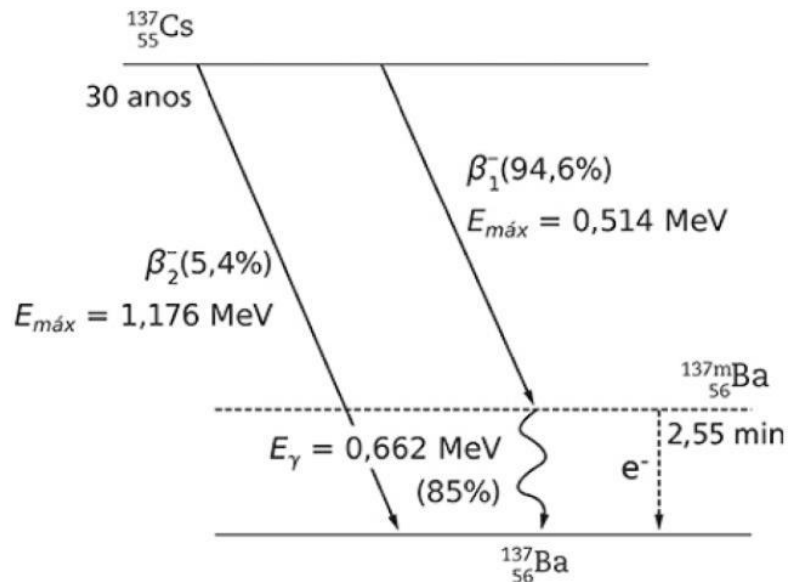


Figura 2.5 Esquema de decaimento do  $^{137}\text{Cs}$  (EMICO OKUNO; YOSHIMURA, 2010)

A deposição do  $^{137}\text{Cs}$  em solos tem sido estudado por diversos autores. A mobilidade desse radionuclídeo pode ser afetada por algumas características do solo (RIBEIRO *et al.*, 2016). O  $^{137}\text{Cs}$  quando alcança o solo é adsorvido firmemente pelas argilas, tendo sua subsequente redistribuição lateral associada à erosão, transporte e deposição do solo devido à chuva e ao vento (ANDRELLO, A. C.; APPOLONI, 2005). A adsorção do  $^{137}\text{Cs}$  em minerais do solo altera significativamente a sua taxa de migração (ZYGMUNT; CHIBOWSKI; KLIMOWICZ, 1998). O  $^{137}\text{Cs}$  pode ser fixado pelos argilominerais 2:1, entre os quais estão a illita e a vermiculita e em menor proporção pelos óxidos de Fe e argilominerais 1:1, como a caulinita (CREMERS *et al.*, 1988; DUMAT; STAUNTON, 1999).

Além da pouca mobilidade em solos argilosos, o  $^{137}\text{Cs}$  é acumulado em solos contendo matéria orgânica, sendo encontrado na literatura correlação entre o teor de  $^{137}\text{Cs}$  e o teor de matéria orgânica nas camadas de solo que apresentavam maior teor desse

radionuclídeo (MABIT; BERNARD, 1998). Outro fator importante para a acumulação de  $^{137}\text{Cs}$  em solos é o índice de precipitação anual da região. Solos em locais mais chuvosos tendem a acumular mais  $^{137}\text{Cs}$ . Ou seja, a variabilidade espacial do “*fallout*” do  $^{137}\text{Cs}$  parece estar fortemente relacionadas as taxas de precipitação e os padrões de distribuição anual das chuvas (DAVIES, 1963).

Estudos realizados em solos brasileiros mostram atividade específica de  $^{137}\text{Cs}$  variando de 0,3 a 5,2 Bq/kg, sendo que a sua deposição no solo tende a aumentar de acordo com o distanciamento da linha do equador (RIBEIRO, *et al.*, 2016).

Em estudo realizado no Estado de Pernambuco mostrou que as maiores atividades de  $^{137}\text{Cs}$  ocorreram nas camadas superficiais de solo e variaram de 0,5 a 1,6 Bq/kg. Os valores de atividade decresceram linearmente com a profundidade, até os limites de detecção: 18 cm na cidade de Araripina (PE), 15 cm em Goiana (PE) e 9 cm em Sertânia (PE), sendo os solos: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Espodosolo Vermelho-Amarelo latossólico e Neossolo Litólico. A precipitação pluvial anual nas cidades são 712, 1.754 e 528 mm respectivamente (ANTUNES *et al.*, 2010). Segue a Figura 2.6 que representa a distribuição da atividade de  $^{137}\text{Cs}$  em função da profundidade em solos em três cidades do Estado de Pernambuco.

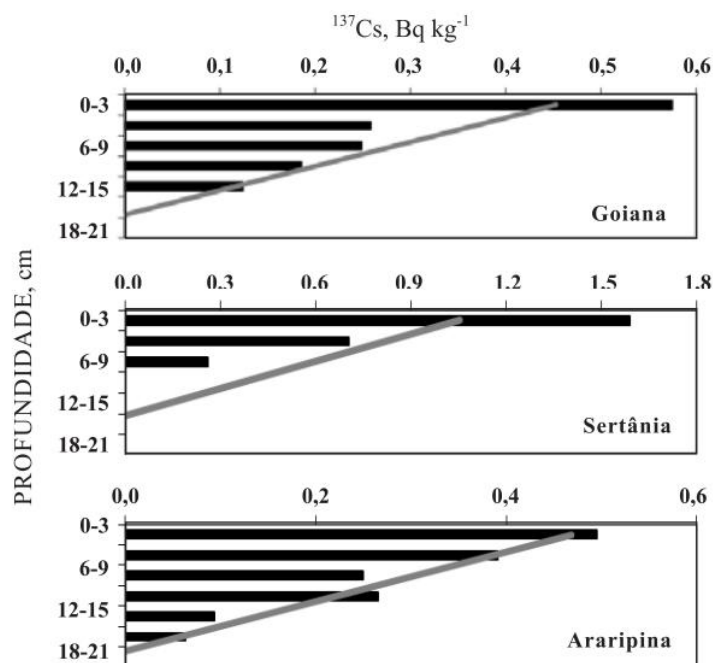


Figura 2.6 Perfil de distribuição da concentração de  $^{137}\text{Cs}$  pela profundidade, em três áreas de Pernambuco (ANTUNES *et al.*, 2010)



## **2.5 Solos**

### **2.5.1 Definição**

A conceituação de solo pode ser realizada de diversas maneiras, pois a mesma depende da sua utilização. Dessa forma, vários profissionais definem o solo de forma diferente: para um geólogo o solo é percebido como o produto da alteração das rochas, para o engenheiro agrônomo ou florestal o solo é visto como um meio para o desenvolvimento de plantas e um engenheiro civil preocupa-se principalmente com a estabilidade do mesmo a fim de estabelecer as fundações de edificações.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) define solo como uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva, podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas (EMBRAPA, 2006).

Uma outra definição, mais ligada à pedologia, entende o solo como a camada viva que recobre a superfície da terra, em evolução permanente, por meio da alteração das rochas e de processos pedogenéticos comandados por agentes físicos, biológicos e químicos.

Assim, de uma forma mais resumida, o solo é produto do intemperismo físico, químico e biológico das rochas e a sua formação é resultante da interação de cinco fatores ambientais: material de origem, clima, relevo, organismos e tempo (JENNY, 1941).

### **2.5.2 Formação dos solos**

O clima é um dos fatores mais relevante para a formação dos solos, já que mudanças de temperaturas atuam no intemperismo da rocha matriz. O clima também está associado as variações de precipitação e umidade de uma região, além da vegetação e do relevo. O intemperismo físico predomina em áreas com climas áridos ou semiáridos (áreas quentes e secas). Por outro lado, o intemperismo químico atua em áreas úmidas onde há maior ocorrência de chuvas. Os organismos vivos também contribuem na formação dos solos, pois podem atacar o solo e a rocha, abrindo poros e liberando ácidos gerados no seu metabolismo, também conhecido como intemperismo biológico ou químico-biológico. Tanto a hidrólise quanto a carbonatação e a complexação têm na

matéria orgânica em decomposição uma fonte importantíssima de CO<sub>2</sub>, essencial para a geração de íons carbonato e bicarbonato, para a acidificação das águas e para a produção de compostos orgânicos com propriedades complexantes; por isso, esses tipos de reações químicas podem ser considerados como intemperismo químico-biológico (TOLEDO, 2014)

O relevo também tem uma grande influência na formação dos solos. Em regiões mais acidentadas os solos tendem a ser mais rasos e menos desenvolvidos, uma vez que em áreas íngremes a água das chuvas tende a escoar e não a infiltrar, removendo o material. Um exemplo de solo raso é o Neossolo Litólico. Entretanto, em locais mais aplainados existe mais probabilidade de armazenar a água, podendo a mesma infiltrar no solo, favorecendo o intemperismo químico por um tempo maior. Nessas regiões existe uma forte tendência a formar solos mais profundos, como os Latossolos e Argissolos.

Assim, assumem papel primordial o clima e o relevo, com sua influência na lixiviação ou retenção dos elementos químicos inicialmente presentes nas rochas (TOLEDO, 2014).

O material de origem é na maioria das vezes a rocha matriz ou um material sedimentar que origina o solo. As rochas são normalmente consideradas como matéria bruta que origina a fração mineral do solo: quanto menos desenvolvidos os solos mais ele se parecerá com a rocha (LEPSCH, 2002). Ou seja, no caso de solos mais “jovens” ou pouco desenvolvidos, como os Neossolos, por exemplo, este guardará mais as características do material de origem (a rocha na maioria das vezes).

Todos os fatores pedogenéticos podem estar em menor ou maior grau associados. Por exemplo, a rocha matriz, dependendo de sua resistência ao intemperismo, influencia no relevo, que por sua vez pode influenciar no clima e assim esses fatores atuam no tempo da pedogênese.

A presença combinada de outros fatores ambientais que contribuem para a formação dos solos, tais como, umidade, calor e um relevo mais aplainado produz solos de perfis mais desenvolvidos em um tempo mais curto. De qualquer forma, quanto mais tempo os agentes ambientais causadores de intemperismo atuam, maior é a tendência do solo ser mais profundo.

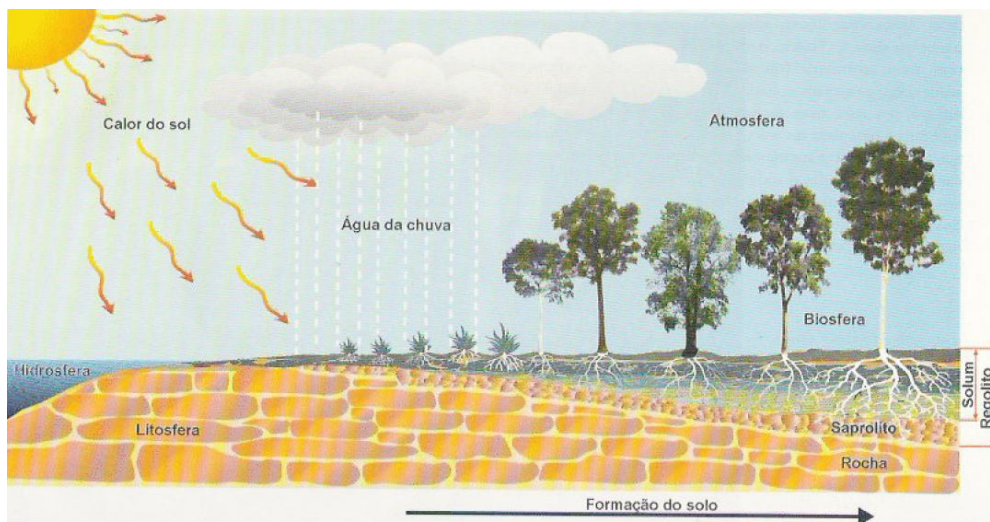


Figura 2.7 Processo de formação do solo (LEPSCH, 2002)

A atuação dos fatores de formação e dos processos pedogenéticos no solo dão origem a camadas, aproximadamente paralelas, chamadas de horizontes pedogenéticos. Os horizontes possuem atributos físicos, químicos e mineralógicos suficientemente distintos para individualizá-los segundo critérios morfogenéticos.

### 2.5.3 Horizontes pedogenéticos

Quando os solos são bem desenvolvidos possuem pelo menos quatro horizontes, que na maioria das vezes são identificados pelas seguintes letras: O, A, B e C (Figura 2.8).

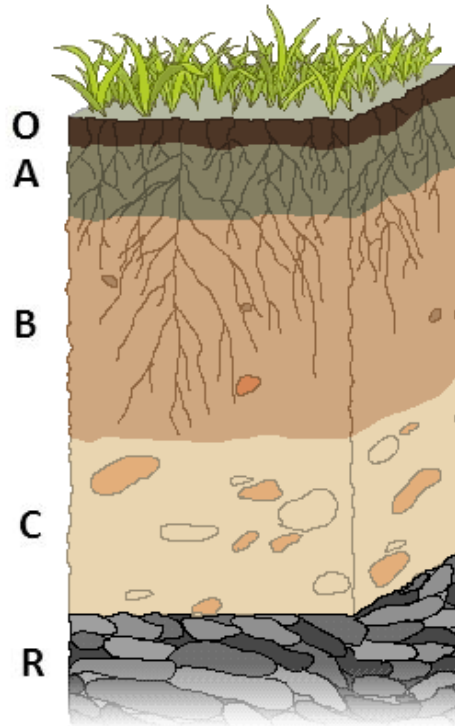


Figura 2.8 Horizontes típicos de um solo bem desenvolvido

O horizonte O é uma camada orgânica mais externa do solo composta por folhas, galhos, flores, frutos, restos e dejetos de animais em estágio de decomposição e, por isso, possui cor mais escura.

O horizonte A é o horizonte mineral mais próximo da superfície, com uma relativa presença de matéria orgânica proveniente do horizonte O. Esse horizonte é bastante influenciado pelo clima e possui alta atividade biológica, com a presença de raízes de plantas, bactérias e fungos.

O horizonte B está abaixo do horizonte A e acima do horizonte C. Esse é um horizonte de acumulação, com uma grande presença de minerais e com baixo acúmulo de material orgânico. Os organismos vivos estão em menor número que no horizonte A, mas mais abundantes que no horizonte C. Na maioria das vezes, seu conteúdo de argila é superior aos demais horizontes.

O horizonte C é o material de origem da parte mineral do solo, formado pelo intemperismo da rocha matriz ou pela deposição de material provenientes de outros locais trazidos pela ação da água ou do vento.

O horizonte R representa a camada mineral de material consolidado, ou seja, na maioria dos casos a rocha matriz com diferentes graus de alteração.

Com relação à profundidade dos solos, os mesmos podem ser considerados rasos quando possuem menos de 50 cm, com profundidade intermediária quando variam entre 50 a 100 cm e profundos quando possuem de 100 a 200 cm até a rocha matriz. Dependendo dos fatores ambientais, solos podem ser formados com profundidades superiores a 200 cm.

#### **2.5.4 Classificação de solos brasileira (EMBRAPA, 2006)**

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) compreende 6 níveis categóricos, organizados de forma hierárquica partindo-se de classes de categoria mais genéricas para a formulações de classes de categoria mais específicas.

O 1º nível (ordem) possui 13 classes que são: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos. Os demais níveis são assim denominados: 2º nível (subordem), 3º nível (grandes grupos), 4º nível (subgrupo), 5º nível (família) e 6º nível (série).

Esse sistema de classificação leva em consideração o perfil do solo, sendo avaliado em relação a variabilidade dos atributos, propriedades e características dos horizontes constituintes do perfil. Em cada horizonte ou camada, são estudadas as características morfológicas, que são: espessura, cor (inclui mosqueado), textura, estrutura, consistência do solo seco, úmido e molhado, porosidade e transição entre os horizontes. Outras características que podem ocorrer eventualmente são também registradas, tais como: cerosidade, superfície de compressão, gilgai entre outras (JACOMINE, 2008).

##### **2.5.4.1 Classes do 1º nível categórico (ordens)**

As diversas classes do 1º nível categórico foram separadas pela presença ou ausência de determinados atributos, horizontes diagnósticos ou propriedades que são passíveis de serem identificadas no campo, mostrando diferenças no tipo e grau de desenvolvimento dos processos que atuaram na formação dos solos (EMBRAPA, 2006).

Tabela 2.2 Nome das ordens dos solos segundo o SiBCS com os respectivos termos de conotação (JACOMINE, 2008)

<b>Classe</b>	<b>Elemento Formativo</b>	<b>Termos de conotação e de memorização</b>
ARGISSOLO	ARGI	“Argila”. Acumulação de argila com atividade baixa ou com atividade alta conjugada com concentração de alumínio trocável.
CAMBISSOLO	CAMBI	“Cambiare”, trocar ou mudar. Horizonte B incipiente, ou seja, ainda não totalmente transformado, seja pela presença de materiais primários intemperizáveis ou por atividade da argila alta.
CHERNOSSOLO	CHERNO	Preto, rico em matéria orgânica e alta saturação por bases
ESPODOSSOLO	ESPODO	“Spodos”, cinza vegetal. Horizonte B espódico, ou seja, com concentração de matéria orgânica ou sesquióxidos.
GLEISSOLO	GLEI	Glei. Horizonte glei, ou seja, horizonte de cores cinzentas decorrentes de hidromorfismo.
LATOSSOLO	LATO	“Lat”, material muito alterado. Horizonte B latossólico.
LUVISSOLO	LUVI	“Luere”, iluvial. Acumulação de argila conjugada com argila de atividade alta e saturação por bases elevada.
NEOSSOLO	NEO	Novo. Pouco desenvolvimento pedogenético.
NITOSSOLO	NITO	“Nitidus”, brilhante. Horizonte B nítico.
ORGANOSSOLO	ORGANO	Orgânico. Horizonte orgânico H ou O
PLANOSSOLO	PLANO	“Planus”. Horizonte B plânico
PLINTOSSOLO	PLINTO	“Plinthus”. Horizonte plíntico.
VERTISSOLO	VERTI	“Vertere”, inverter. Horizonte vértico.

#### 2.5.4.2 Classes do 2º nível categórico (subordens)

Segundo JACOMINE (2008) classes de solos são separadas por propriedades ou características diferenciais que:

- a) refletem a atuação de outros processos de formação que agiram conjuntamente ou afetaram processos dominantes e cujas características foram utilizadas para separar os solos no 1º nível categórico; ou,
- b) ressaltam as características responsáveis pela ausência de diferenciação de horizontes diagnósticos; ou,
- c) envolvem propriedades resultantes da gênese do solo e que são extremamente importantes para o desenvolvimento das plantas e/ou para usos não agrícolas, que tenham grande número de propriedades acessórias; ou,
- d) ressaltam propriedades ou características diferenciais que representam variações importantes dentro das classes do 1º nível categórico.

#### 2.5.5 Solos do Nordeste

A região Nordeste do Brasil, em razão da diversidade de climas, formações vegetais, tipos de rochas e conformações do relevo, apresenta uma grande diversidade de ambientes e, conseqüentemente, de solos (EMBRAPA, 2014).

Como se pode depreender da Figura 2.9 mais da metade dos solos da região Nordeste são Latossolos (29,5%) ou Neossolos (24,0%). Há também predominância de Argissolos (16,7%), Luvissolos (8,7%) e Planossolos (7,3%).

No Estado de Alagoas, observa-se pelo mapa (Figura 2.9) a prevalência dos Latossolos e Argissolos na região mais próxima ao litoral, enquanto que se observa a prevalência de Neossolos e Planossolos na região semiárida do Estado. Esse padrão se repete para o Estado de Sergipe, Pernambuco e para a região do Nordeste do Estado da Bahia.

Ainda com relação ao Estado de Alagoas, analisando os solos da zona úmida costeira em direção ao semiárido, nota-se uma forte influência das elevadas precipitações e temperaturas na zona mais úmida, determinando a formação de solos mais profundos e

pobres em nutrientes (Latosolos e Argissolos), em comparação com os do ambiente semiárido.

À medida que se adentra para os ambientes mais áridos do estado (agreste e sertão), diminui-se a influência do fator clima na formação dos solos. Assim, o material de origem gradativamente aumenta sua importância para o solo na região semiárida, passando a ser o fator determinístico na natureza e propriedade dos solos. Nessas condições, passam a predominar solos mais rasos e ricos em bases, guardando uma estreita relação de suas características com o material de origem. Por isso, o arranjo dos solos no semiárido se torna tanto mais complexo quanto forem as variações do material de origem dos mesmos (EMBRAPA SOLOS, 2012).



Figura 2.9 Solos da Região Nordeste do Brasil (EMBRAPA, 2014)



A seguir serão mostrados os tipos de solos mais prevalentes no Estado de Alagoas, objeto do presente estudo.

#### 2.5.5.1 LATOSSOLO

Os Latossolos (Figura 2.10) são bem desenvolvidos, profundos e bem drenados com horizonte B latossólico (Bw). Apresenta características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas uniformes no perfil. Exibe cores vermelhas, vermelho-amarelas, amarelas, acinzentadas ou brunadas. Ocorre comumente em relevo suave ondulado a plano. Sua sequência de horizontes é do tipo A – Bw – C. Apresenta boa capacidade de armazenamento de água e efluentes, além de bom potencial para uso com mecanização agrícola e agricultura irrigada. Esses solos possuem fertilidade natural baixa, problemas com fixação de fósforo e coesão natural em alguns indivíduos amarelos, notadamente àqueles que ocupam a região dos Tabuleiros Costeiros. Esta ordem de solos é subdividida em quatro subordens: Latossolos Brunos, Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelos (EMBRAPA, 2014).



Figura 2.10 A figura da esquerda (a) mostra a região típica de ocorrência de Latossolos e a figura da direita (b) mostra o perfil típico desse solos (adaptado de EMBRAPA, 2014)

## 2.5.5.2 NEOSSOLOS

Os Neossolos são solos minerais pouco desenvolvidos com ausência do horizonte B diagnóstico. Esta ordem de solos é subdividida em quatro subordens: Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos, Neossolos Quartzarênicos e Neossolos Flúvicos.

### 2.5.5.2.1 NEOSSOLO LITÓLICO

Segundo EMBRAPA (2014), os Neossolos Litólicos são rasos e geralmente pedregosos (Figura 2.11). Apresenta contato lítico dentro de 50 cm de profundidade. Forma-se a partir de qualquer tipo de rocha, associado comumente a um relevo movimentado. Esse solo possui nítido predomínio de atributos físicos, químicos e mineralógicos herdados do material de origem. A sequência de horizontes é do tipo: A – C – R ou A – R (figura 2.9b). Este tipo de solo possui pequena capacidade de armazenamento de água e é utilizado como substrato para pastagem natural e cultivos de subsistência em áreas planas.



Figura 2.11 Ao lado esquerdo (a) a figura mostra a região típica de desenvolvimento de perfil típico de um Neossolo e figura do lado direito (b) mostra o perfil típico de um Neossolo Litólico (adaptado de EMBRAPA, 2014)

#### 2.5.5.2.2 NEOSSOLO REGOLÍTICO

Este solo possui minerais primários de fácil alteração em quantidade significativa na massa do solo e apresenta textura arenosa a média e pequena diferenciação entre horizontes no perfil (Figura 2.12). A sequência de horizontes do tipo: A – C – R ou A – C. Esses solos possuem drenagem boa a moderada, ocorre em relevo pouco movimentado, e, às vezes, apresentam pequena profundidade. É utilizado como substrato para cultivos agrícolas de subsistência, pastagem, pecuária extensiva e agricultura irrigada.



Figura 2.12 Perfil típico de um Neossolo Regolítico (EMBRAPA, 2014)

#### 2.5.5.3 ARGISSOLO

Segundo EMBRAPA (2014) esse solo (Figura 2.13) apresenta acúmulo de argila em subsuperfície, tipificado pelo horizonte B textural (Bt). São solos minerais bem desenvolvidos e drenados, profundos a muito profundos. Exibe cores vermelhas, vermelho-amarelas, amarelas, acinzentadas ou brunadas. Apresenta sequência de horizontes do tipo: A – E– Bt – C – R ou A – Bt – C – R. Apresenta uma boa capacidade de armazenamento de água e efluentes, bom potencial para mecanização agrícola e agricultura irrigada, quando em relevo plano a suave ondulado. Os Argissolos possuem,

de modo geral, como fator limitante, baixa fertilidade natural, alta suscetibilidade à erosão quando possui mudança textural abrupta, coesão natural em alguns solos amarelos e associação com relevo movimentado. É utilizado na agricultura intensiva, pastagem e silvicultura.

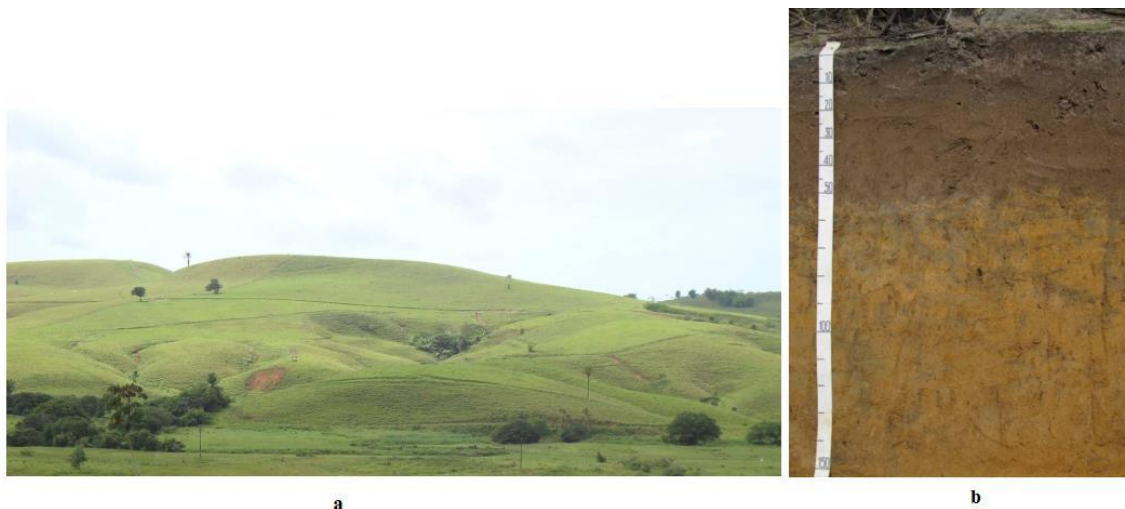


Figura 2.13 A figura da esquerda (a) mostra a região típica de ocorrência de um Argissolo e a figura da direita (b) o perfil típico desse solo, adaptado de (EMBRAPA, 2014)

#### 2.5.5.4 PLANOSSOLO

Segundo EMBRAPA (2014), esse solo (Figura 2.14) possui acúmulo significativo de argila em subsuperfície (horizonte B plânico). Apresenta transição abrupta entre os horizontes A ou E, e o B plânico subjacente. O horizonte B possui estrutura colunar, prismática, em blocos, maciça ou combinações dessas formas. Solo imperfeitamente a mal drenado, apresentando cor pálida. Ocorrência dominante em relevo suave ondulado e plano. Sua sequência típica de horizontes é do tipo: A – E – Bt – C – R ou A – E – 2Bt – 2C – 2R.

O potencial para uso agrícola do Planossolos depende da espessura dos horizontes A+E e pode ser utilizado também para fabricação de utensílios de artesanato de barro. Esse solo também possui alguns fatores limitantes, tais como, drenagem restrita, alta suscetibilidade à erosão, elevado risco de salinização e de solonização, consistência dura a extremamente dura do horizonte B plânico, pequena profundidade efetiva e

pedregosidade superficial. É utilizado como substrato para pastagem, pecuária extensiva, culturas agrícolas anuais de subsistência.



Figura 2.14 A figura da esquerda (a) mostra a região típica de ocorrência de um Planossolo e a figura da direita (b) o perfil típico desse solo, adaptado de (EMBRAPA, 2014)

## 2.6 O Estado de Alagoas

Alagoas é um Estado da região Nordeste do Brasil que possui 102 municípios e área total de aproximadamente 27.779,343 km<sup>2</sup> (IBGE, 2002) o que representa 1,78% da área total da região Nordeste e 0,32% do território nacional. É o segundo menor Estado do Brasil, superando apenas a área territorial do Estado de Sergipe (ALAGOAS, 2014). Com base na antiga regionalização, extinta em 2017 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mas útil para o presente trabalho, o Estado se divide em três mesorregiões: agreste alagoano, leste alagoano e sertão alagoano. Essa divisão é útil pois guarda relação direta com o clima e os solos das regiões, que acabaram influenciado aspectos socioeconômicos.

A região do sertão é caracterizada por possuir clima semiárido, com precipitação irregular de chuvas e umidade relativa do ar baixa. A vegetação predominante é a Caatinga, sendo a densidade demográfica baixa (50,12 hab/km<sup>2</sup>). A economia desta região

está baseada principalmente na pecuária (caprinos e bovinos). Os principais produtos cultivados nessa região são o feijão e a mandioca. A área é de 8.633 km<sup>2</sup>, com população de 432.667 habitantes (IBGE, 2010).

A região do agreste está localizada na área central do estado de Alagoas (entre o sertão e o leste alagoano) e, por isso, é uma região de transição que apresenta características das duas regiões. Dentre as culturas a que mais se destaca é o fumo, mas também são produzidos feijão, amendoim, mandioca, milho, caju, algodão e cana-de-açúcar. Possui área de 5.782 km<sup>2</sup> e população 623.302 habitantes. A densidade demográfica é de 108,61 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2010).

Já a região do leste de Alagoas possui clima tropical litorâneo úmido, com temperaturas variando em média entre 19°C a 32°C. A umidade relativa do ar é de 79,2% e o índice pluviométrico é 1.410 mm/ano. A agricultura baseia-se principalmente com o cultivo de cana-de-açúcar. A densidade demográfica é 167,89 hab/km<sup>2</sup>.

O Estado de Alagoas limita-se ao Norte com Pernambuco, ao Sul com Sergipe, a Oeste com a Bahia e a Leste com o Oceano Atlântico, sendo que sua localização fica entre as coordenadas geográficas de Latitudes 8°40'00"S e 10°40'00"S e entre as Longitudes 38°20'00"O e 35°20'00"O (ALAGOAS, 2014).

As diferentes paisagens que integram o Estado de Alagoas apresentam uma grande variabilidade na distribuição dos solos, em especial no ambiente semiárido. Esse fato é uma consequência direta da influência dos fatores de formação dos solos, que envolvem o clima, o material de origem, os organismos, o relevo e o tempo (EMBRAPA SOLOS, 2012). A seguir são apresentadas o mapa (Figura 2.15) do Estado de Alagoas com as suas mesorregiões e, na sequência, a Figura 2.16 dos diferentes tipos de solo encontrados no Estado classificados no segundo nível categórico.

Na comparação das Figura 2.15 e Figura 2.16 nota-se a prevalência de solos menos desenvolvidos (solos jovens) na região do semiárido e solos mais desenvolvidos (maduros) na região costeira (leste alagoano).

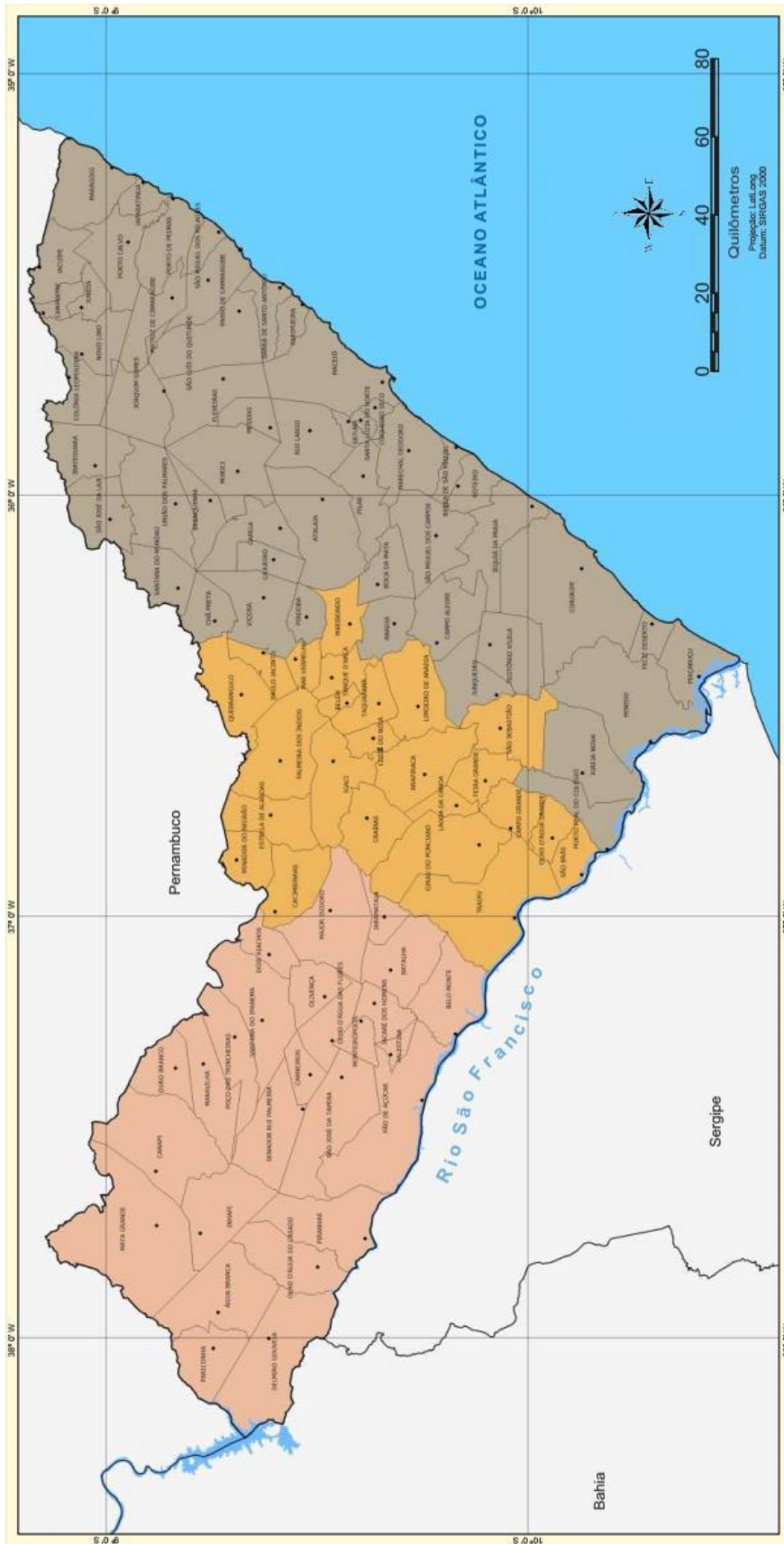


Figura 2.15 Mesorregiões do Estado de Alagoas adaptado (IBGE, 2010 apud ALAGOAS, 2014)

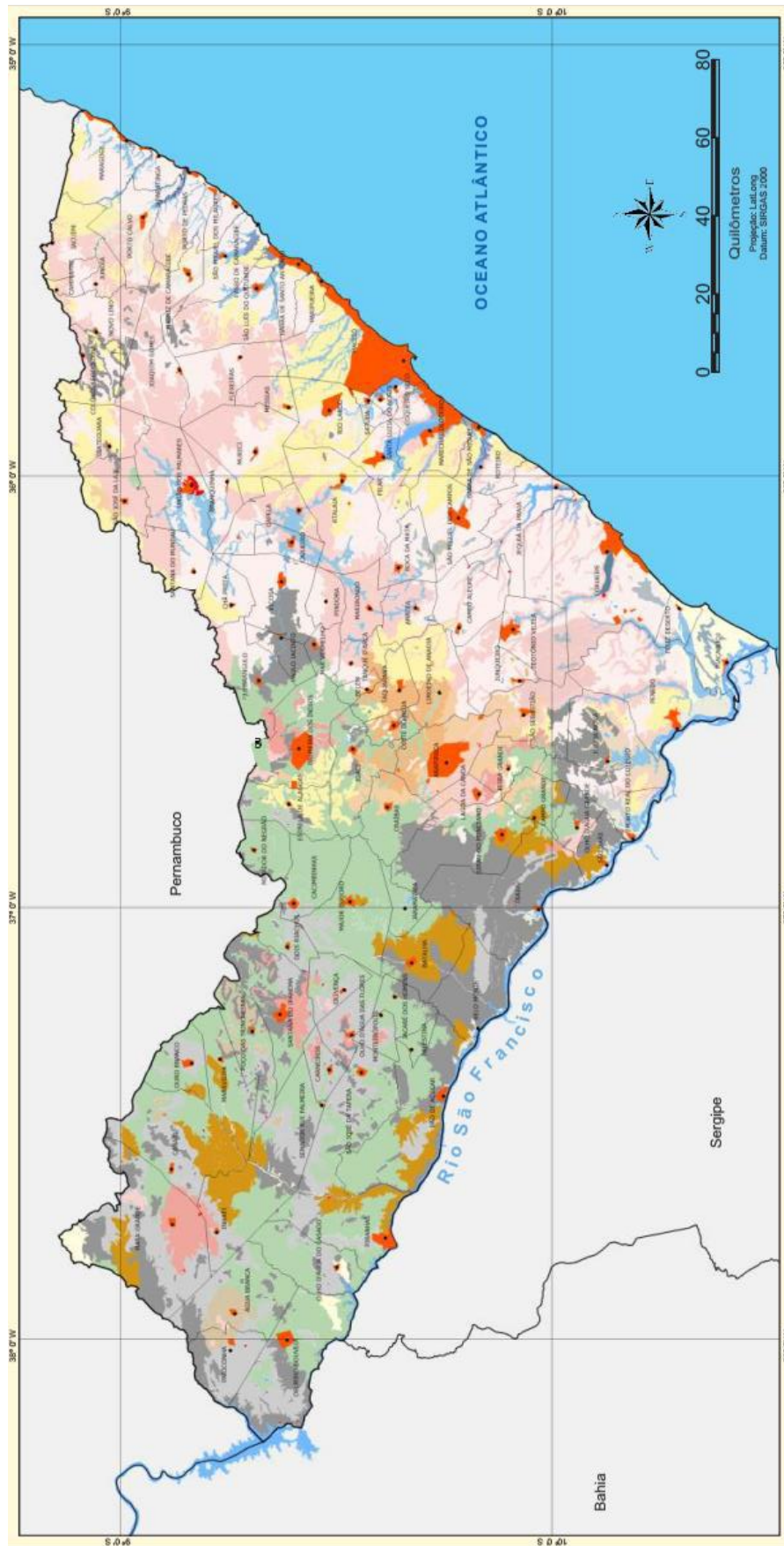


Figura 2.16 Solos do Estado de Alagoas (ALAGOAS, 2014)



A geologia de Alagoas é composta basicamente por rochas ígneas e metamórficas datadas do período Pré-cambriano. Caracteriza-se ainda pela predominância da Formação Barreiras e pelos Sedimentos Quaternários Fluviomarinhas que formam as dunas, os aluviões e as restingas (ALAGOAS, 2014).

Em relação à Geomorfologia, podemos citar como registros as Planícies Fluviais, Marinhas, Fluviomarinhas e fluviolagunares; além de um grande domínio dos Tabuleiros Costeiros desde o litoral norte até o litoral sul; o Planalto da Borborema, na porção Nordeste do Estado e o Pediplano Sertanejo que se estende do Agreste para o Sertão (ALAGOAS, 2014), como pode ser visto na Figura 2.17.

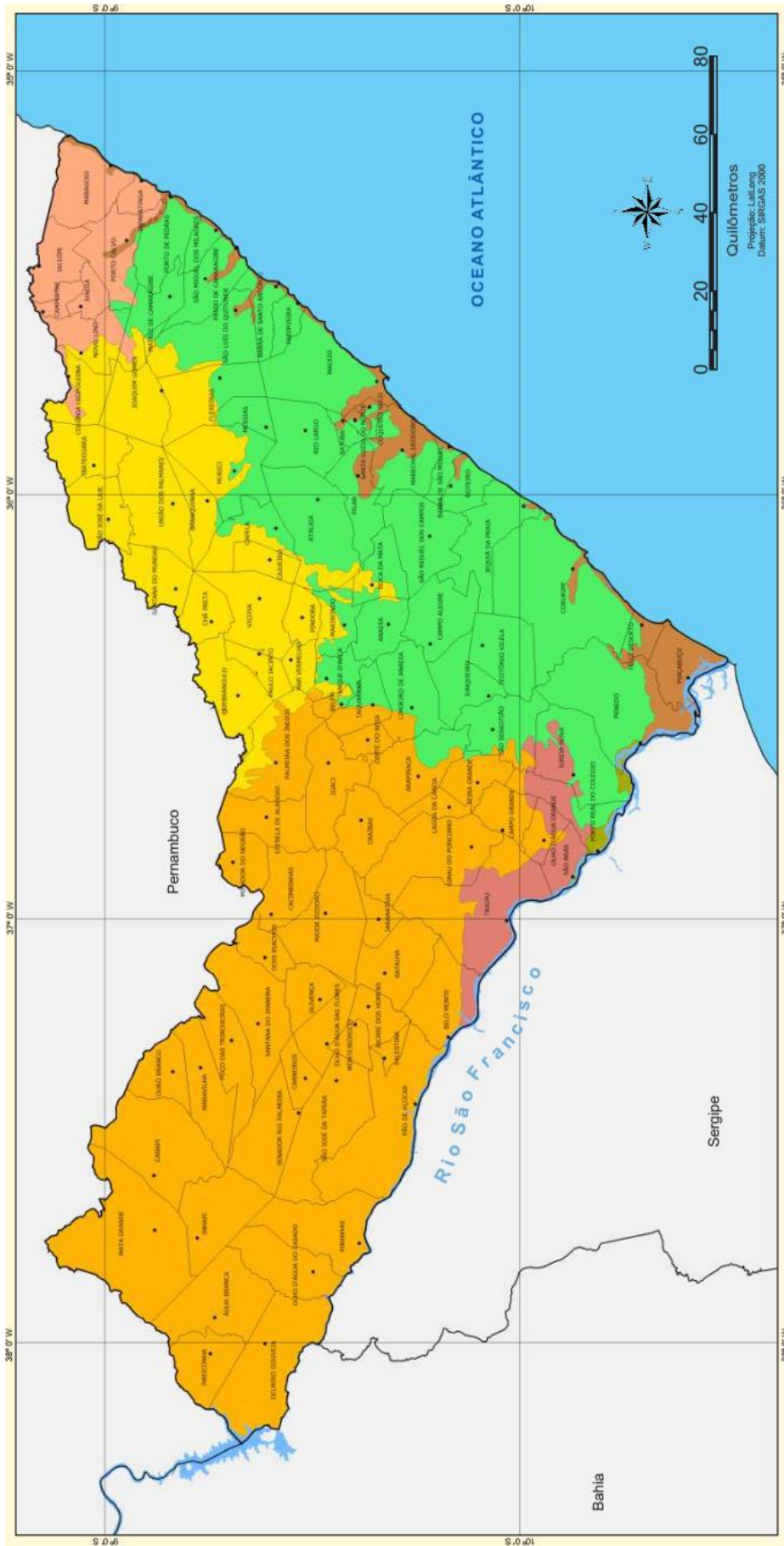


Figura 2.17 Geomorfologia do Estado de Alagoas (ALAGOAS, 2014)

Pode-se ainda representar a elevação de um terreno através de cores, sendo geralmente utilizado um sistema de cores de acordo com a cota do terreno como mostrado na Figura 2.18 para o Estado de Alagoas. O relevo alagoano é dividido em: planície litorânea (leste), planalto (norte) e depressão (centro-oeste).

As maiores elevações são localizadas no interior do Estado, na divisa com Pernambuco. A Serra da Onça, com 1.016 metros de altitude, é possui o ponto mais alto do Estado e é localizada no município de Mata Grande no extremo oeste alagoano. Esta região apresenta embasamentos cristalinos (gnaiesses, granitos, xistos) formados no período Pré-Cambriano.

A planície litorânea é pouco desenvolvida com acúmulo de sedimentos marinhos e fluviais. A faixa costeira é formada por colinas e tabuleiros areníticos baixos que adentram em aproximadamente 40 km para o interior do estado. Na porção sul do estado a planície costeira é mais desenvolvida. No agreste, divisa com Pernambuco, pode-se encontrar a encosta meridional do Planalto da Borborema. Na parte oeste de Alagoas, encontra-se o Pediplano do Baixo São Francisco, uma região com relevo mais movimentado.

O regime de chuvas do Estado de Alagoas está diretamente relacionado com as configurações da circulação atmosférica e oceânica em grande escala sobre os trópicos, mas também fica submetida à influência de sistemas de mesoescala, como os complexos convectivos e as brisas marítimas e terrestres que influenciam todas as sub-regiões, além das circulações orográficas e pequenas células convectivas que constituem os fenômenos de microescala (EMBRAPA, 2012a). A Figura 2.19 mostra a distribuição de precipitação no estado.

Em todo o estado não há grandes oscilações da temperatura média do ar, variando, no litoral, entre 23°C e 28°C, e no sertão, entre 17°C e 33°C. As condições térmicas da região Nordeste, de forma geral, não possuem importantes variações no decorrer do ano. Nas áreas de altitudes mais elevadas, em contato com as encostas do Planalto da Borborema e mais expostas aos ventos de Sudeste, as temperaturas médias do ar são mais amenas, em torno de 21°C a 23°C (EMBRAPA, 2012b).

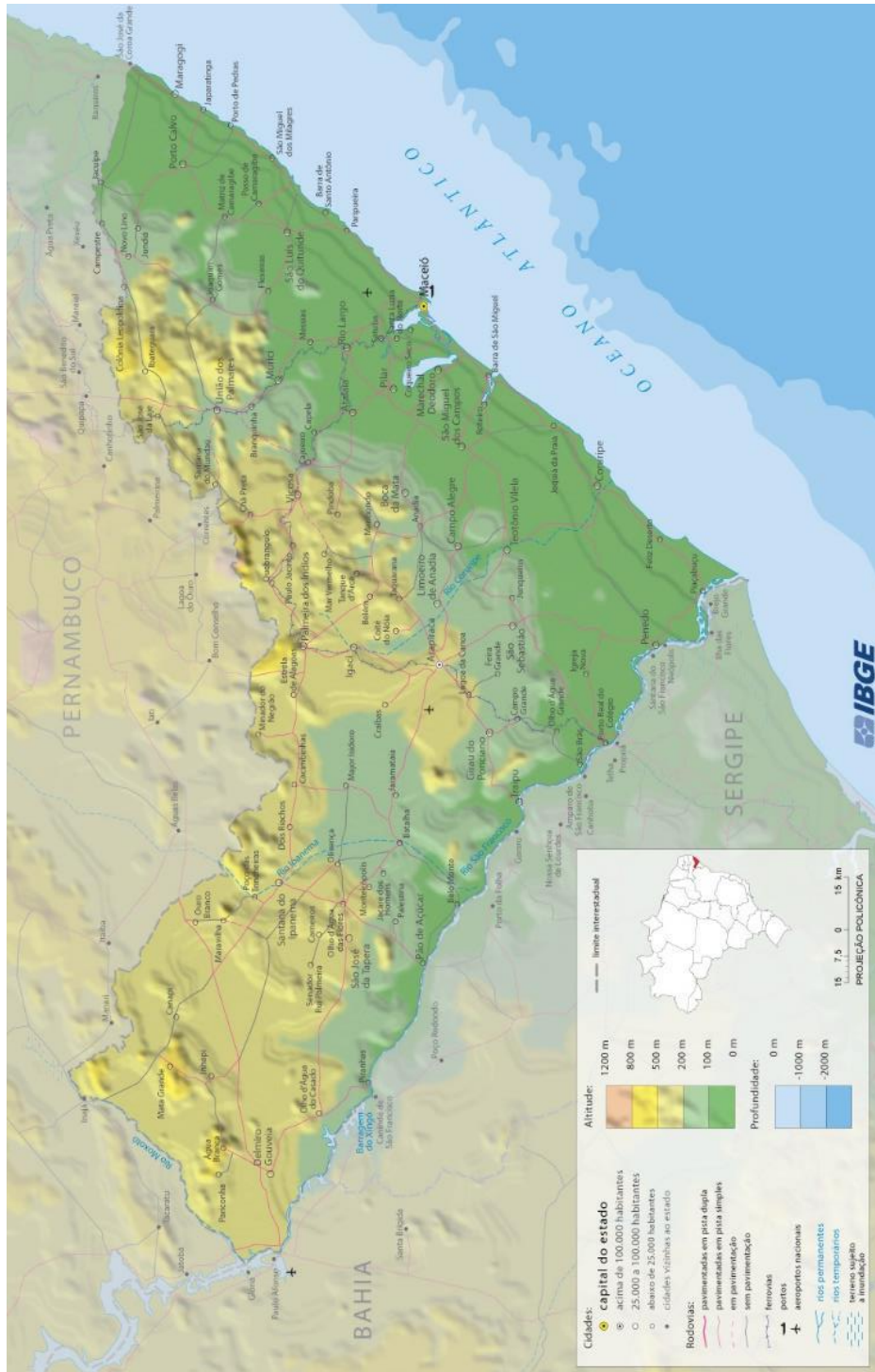


Figura 2.18 Mapa de altitude do Estado de Alagoas (ALAGOAS, 2014)

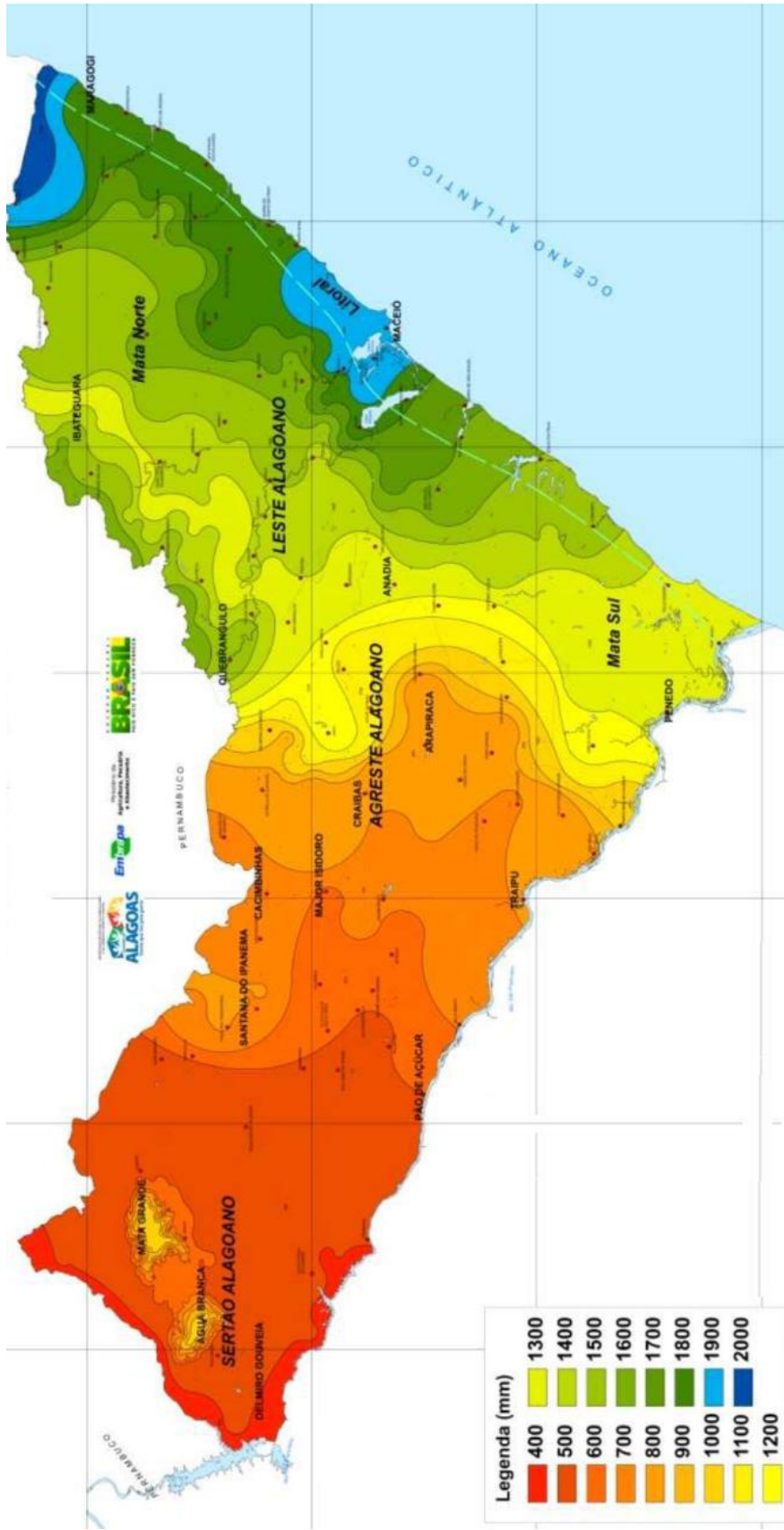


Figura 2.19 Precipitação pluviométrica média anual (EMBRAPA, 2012b)

Aproximadamente 37% da população do Estado de Alagoas estão concentradas na região metropolitana de Maceió, com pouco mais de um milhão de habitantes, como demonstrado na Figura 2.20. A maioria dos municípios não possui mais de 50.000 mil habitantes, sendo os municípios mais populosos Arapiraca (234.185), Rio Largo (76.019), Palmeira dos Índios (74.208), União dos Palmares (66.477), Penedo (64.497) e São Miguel dos Campos (61.204).

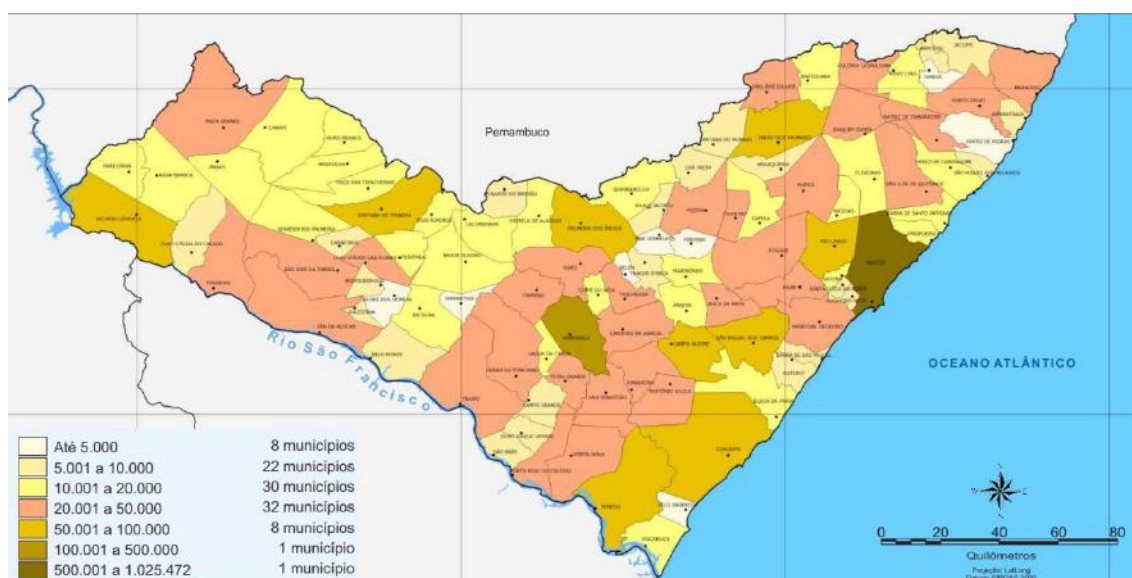


Figura 2.20 Projeção da população – 2016 (ALAGOAS, 2014)

O total da população residente na área rural dos municípios alagoanos, segundo censo demográfico do IBGE de 2010, é mostrado na Figura 2.21. A área rural da região do agreste e sertão do estado possui mais habitantes que na área rural da região leste do Estado, onde a população se concentra mais nas cidades. Destaque para o município de Arapiraca, produtora de tabaco, que possui mais de 30 mil pessoas vivendo na área rural.

É aqui apresentado a Figura 2.22 que mostra o mapa com a indicação de propriedades rurais com mais de 100 ha, que indica os locais onde se concentram propriedade maiores, que são tendentes à agricultura intensiva. Em contrapartida, no sertão, são encontradas propriedades rurais menores que são mais típicas de agricultura extensiva.

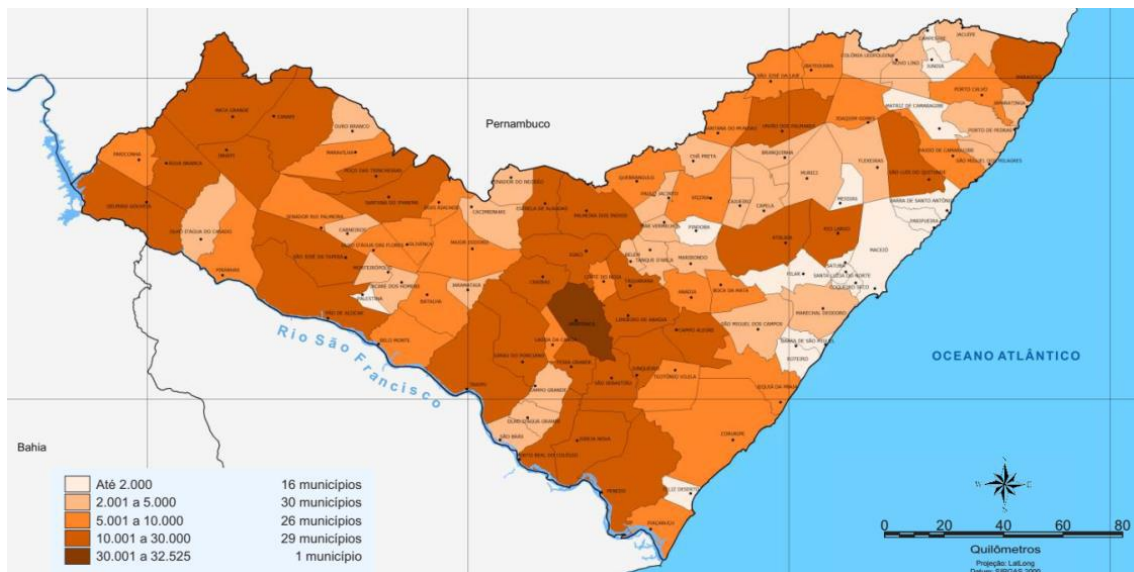


Figura 2.21 – População na área rural – 2010 (ALAGOAS, 2014)

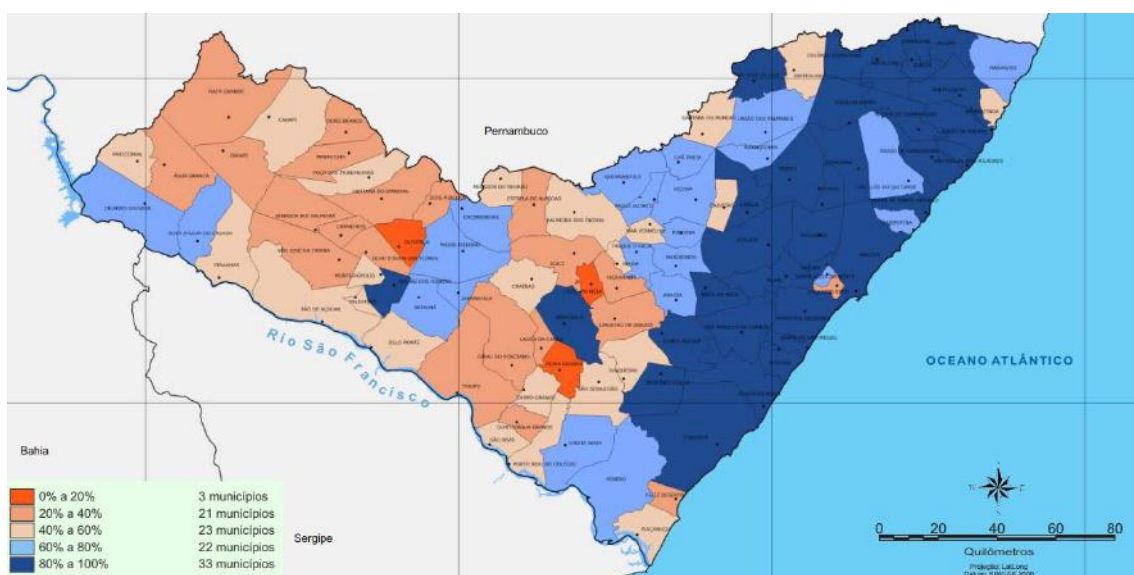


Figura 2.22 Terras em estabelecimentos maiores que 100 ha (ALAGOAS, 2014)

O Estado de Alagoas é o maior produtor de açúcar da região nordeste, seguido pelo Estado de Pernambuco. Segue no mapa abaixo (ALAGOAS, 2014) a porcentagem da área do município ocupada por cana-de-açúcar. Obteve-se o resultado dividindo a área plantada da cana-de-açúcar em hectare pela área total do município em hectare multiplicado por cem. Nota-se grande concentração da cultura na região leste alagoana, que possui clima favoráveis ao cultivo (Figura 2.23).

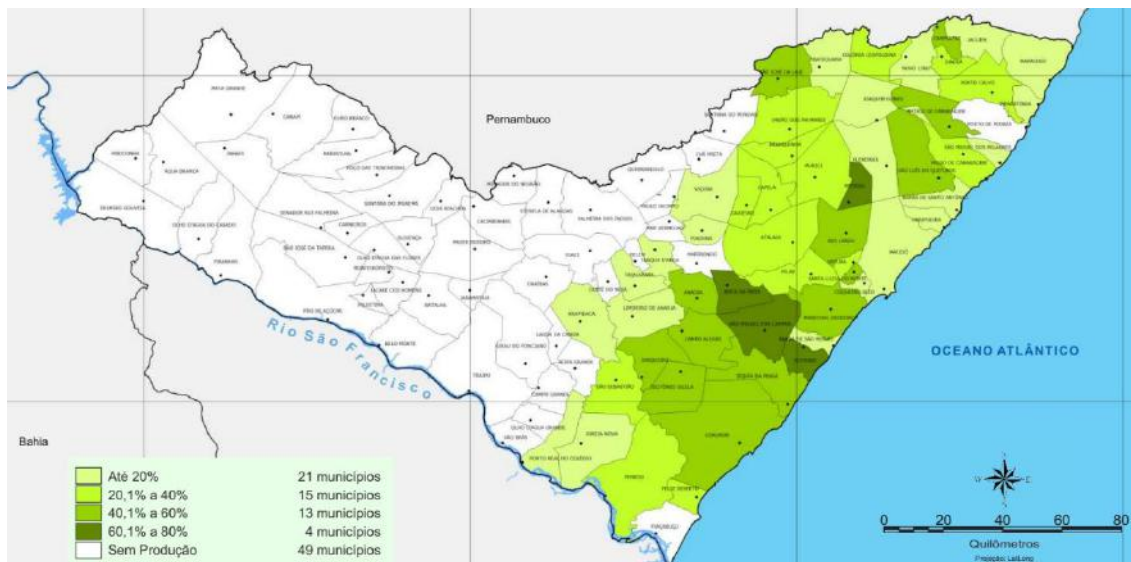


Figura 2.23 Área ocupada por cana-de-açúcar em 2012 (ALAGOAS, 2014)

A Figura 2.24 mostra a quantidade produzida de feijão em toneladas, beneficiado nos estabelecimentos agropecuários do Estado de Alagoas, no ano de 2012. Nota-se maior concentração da produção na região do semiárido do Estado e no sertão.

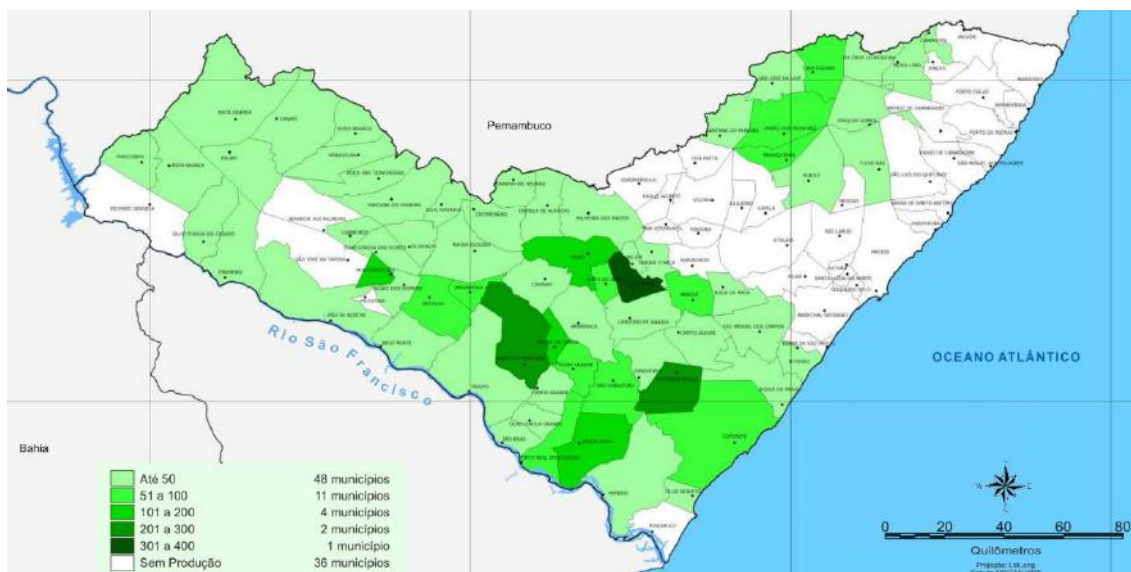


Figura 2.24 Produção de feijão (em toneladas) – 2012 (ALAGOAS, 2014)



## 2.7 Espectrometria gama

A espectrometria gama é uma técnica analítica não-destrutiva que se baseia na geração de um pulso eletrônico proporcional à energia dos raios gama detectados que é amplificado e processado por um sistema eletrônico que gera um espectro de contagens de emissões. Dessa forma, é possível a identificação e quantificação de vários radioisótopos em uma variedade de matrizes (tais como, água, solos, alimentos, entre outros).

A espectrometria gama é muito utilizada no monitoramento de radioatividade ambiental, na geologia e na mineralogia e tem como principal vantagem a simplicidade na preparação das amostras, que não exige preparo químico. De um modo geral, a preparação consiste em secar, peneirar e triturar as amostras dependendo do tipo de amostra e aplicação.

O detector é um importante componente de qualquer sistema de detecção, pois é o meio sensível onde a radiação ionizante interage. Existem vários materiais que podem ser utilizados para a detecção de radiação ionizante, sendo os detectores mais utilizados os operados a gás, cintiladores, semicondutores e os termoluminescentes (LOPES, 2018).

Os detectores de radiação semicondutores começaram a ser utilizados em maior escala a partir dos anos 1960. As amostras do presente trabalho foram medidas em um detector semicondutor de germânio de alta pureza (em inglês: *high-purity germanium ou HPGe*). Esse detector é na verdade um diodo dotado de um cristal com uma junção P-N. Ao se aplicar a alta tensão na polarização reversa cria-se uma região de depleção que é sensível a radiações ionizantes (raios X e raios gama) do detector. Os fótons então ao passar por essa região depletada e, na maioria das vezes, interagem com o material desse volume, quando são criados transportadores de carga (pares elétrons-lacuna) que são atraídos pelo campo elétrico da junção polarizada inversamente.

A carga criada é proporcional à energia depositada no detector pelo fóton absorvido. Esse pulso elétrico criado passará ainda por um processo de pré-amplificação a fim de ser mais facilmente trabalhado.

A principal vantagem do detector semicondutor está na energia média necessária para criar um par elétron-buraco que é cerca de 10 vezes menor do que a energia para criar um par elétron-íon, resultando numa maior resolução em energia. Outra vantagem

está na densidade dos materiais, que é superior e, por isso, eles possuem um poder de frenamento (*stopping power*) maior do que os detectores a gás. A energia média para criar um par elétron-buraco a 77 K, é de 3,76 eV para o silício e de 2,96 eV para o germânio. O grande número de pares criados propicia duas vantagens aos detectores semicondutores sob o ponto de vista da resolução: diminui a flutuação estatística e a influência do ruído eletrônico, levando a uma melhor relação sinal-ruído (KNOLL, 2010 *apud* LOPES, 2018).

Os detectores HPGe requerem o seu resfriamento a temperaturas baixas, uma vez que o germânio possui uma largura de banda proibida relativamente estreita. A excitação causada pela temperatura faz com haja fuga de corrente reversa causando ruído o que prejudica a resolução do detector. Assim, geralmente se utiliza nitrogênio líquido, que tem uma temperatura de 77 K ou -196 °C.

Logo, o sistema de espectrometria gama consiste no detector em si (cristal de germânio), mantido a aproximadamente -190°C no criostato (*dewar*) com nitrogênio líquido ou refrigeração mecânica para reduzir a interferência eletrônica; um pré-amplificador, uma fonte de alta tensão, o amplificador e o analisador multicanal (MCA) (RIBEIRO, 2016).

O MCA converte o pulso de tensões em um número de canal, sendo que cada canal corresponde a uma faixa estreita de tensão. Em sistemas mais modernos o MCA armazena na memória a distribuição das contagens dos pulsos em relação à altura dos pulsos. O resultado é a geração de um espectro em energia que mostra fotopicos característicos dos radionuclídeos analisados. Então um microcomputador é previsto para aquisição dos dados do MCA e instalação de *software* adequado ao gerenciamento do MCA, manipulação do espectro e armazenamento dos dados.

Além disso, em um sistema de detecção existe necessidade de blindagem do detector (Figura 2.25), a fim de reduzir a interferência da radiação externa (*background*). A maioria das blindagens são construídas de chumbo com uma cavidade para acomodar as amostras. Uma blindagem eficiente possui especial importância na medida de amostras ambientais que geralmente possuem baixíssima atividade e a radiação de fundo pode interferir bastante nos resultados.

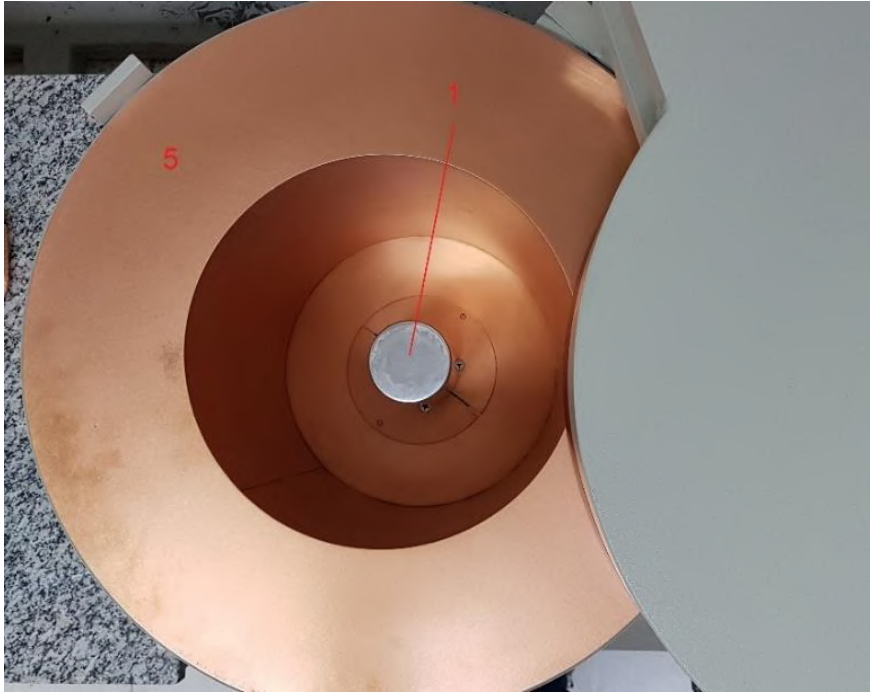


Figura 2.25 Detector de HPGe (1) posicionado no interior da blindagem (5) com cavidade para inserção das amostras

A Figura 2.26 mostra um espectro em energia na tela do computador (6) que recebe os dados do MCA (4) advindos do detector localizado no interior da blindagem (5), sendo o detector resfriado pelo nitrogênio armazenado no interior do *dewar* (5).



Figura 2.26 Sistema de detecção gama com HPGe

## 2.8 Equilíbrio secular

Quando estuda-se decaimentos em série, o equilíbrio secular é um evento importante a ser considerado (LOPES, 2018). Os isótopos iniciais das séries apresentam meias-vidas longas, muito maiores do que qualquer um dos produtos de decaimento. Logo, é possível que seja atingido o equilíbrio radioativo secular, quando as atividades de todos os membros da cadeia são iguais àquela do isótopo que dá origem a série. Entretanto, isso só ocorre se sistema ficar fechado sem trocas químicas e físicas com o meio externo, por um período suficientemente longo para que o equilíbrio aconteça.

Quando o decaimento ocorre em um sistema fechado, por períodos superiores a sete meias vidas do radioisótopo de maior meia vida da respectiva série, as atividades de todos os produtos do decaimento passam a ser iguais àquela do isótopo que dá origem à série (KETCHAM, 1996 *apud* CASTRO, 2016). Esse fenômeno é caracterizado como equilíbrio químico secular.

Por outro lado, é possível obter o equilíbrio secular em de alguns trechos destas séries. A atividade do rádio-226 pode ser encontrada através da medição do bismuto-214 e/ou do chumbo-214, desde que o período de confinamento seja superior a 45 dias (tempo necessário para que o radônio-222 entre em equilíbrio com seus produtos de decaimento) (DOS SANTOS, R. N., MARQUES, L. S., RIBEIRO, 2000).

O equilíbrio secular pode ser demonstrado por meio das seguintes aproximações: o índice 1 se refere ao radionuclídeo pai e o índice 2 ao respectivo filho. Seja  $dN/dt$  a taxa de variação do número de radionuclídeos por unidade de tempo:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.2)$$

Onde  $\lambda_i$  é a constante de decaimento para o radionuclídeo  $i$  ( $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ ).

Considerando  $N_1(0)=N_0$  e  $N_2(0)=0$ , tem-se que a solução da equação diferencial para Equação 2.2 é dada pela Equação 2.3:

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.3)$$

Uma vez que a atividade é dada pela relação  $A = \lambda N$ , podemos escrever:

$$A_2(t) = A_0 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.4)$$

Ao considerar a meia vida do radionuclídeo pai muito maior que do radionuclídeo filho, pode-se considerar  $(\lambda_2 - \lambda_1 \approx \lambda_2)$  e também  $(e^{-\lambda_1 t} \approx 1)$ . Nestas condições, a Equação 2.4, torna-se:

$$A_2(t) = A_0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.5)$$

Fazendo  $t \gg T_{1/2}$ , pode-se aproximar a Equação 2.7 para:

$$A_2(t) = A_1 \quad (2.6)$$

Essa aproximação pode ser aplicada sempre que diversos nuclídeos de meia vida curta surgem de sucessivos decaimentos, a partir de um nuclídeo pai, cuja meia vida seja longa (LOPES, 2018).

## 2.9 PGAGEM Brasil

O Projeto Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica (PGAGEM Brasil) é um projeto iniciado em 2008 que busca executar um mapeamento e conseqüente diagnóstico geoquímico no território brasileiro, contribuir para o estabelecimento de uma Rede Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica e o desenvolvimento de parcerias com instituições federais, estaduais e municipais do setor de saúde pública e meio ambiente, usando as possíveis correlações entre os dados geoquímicos e de mortalidade ou incidência de doenças em humanos e animais (CPRM, 2003). O PGAGEM busca também contribuir para a construção de uma base de dados georreferenciadas a partir dos resultados obtidos das análises das amostras

coletadas e das informações de campo obtidas nos projetos e pesquisas executadas pelas entidades participantes.

Um dos objetivos do projeto é possibilitar a elaboração de um Atlas Geoquímico de todo o Brasil, com os mapas de distribuição dos elementos químicos analisados. Além disso, o projeto busca contribuir também para estudos de monitoramento ambiental.

Uma das parecerias do PGAGEM foi realizada com Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), que desenvolve o projeto Mapeamento da Radioatividade em Solos Brasileiros (MAPRAD). Esse projeto tem como objetivo determinar e mapear a radioatividade natural no País. O MAPRAD busca estimar a dose proveniente da radiação na população, além de mapear riscos de concentração de radônio e estabelecer valores orientadores para radionuclídeos no solo.

## Capítulo 3 **Materiais e Métodos**

### **3.1 Local do estudo**

O Estado de Alagoas possui área total de aproximadamente 27.779,343 km<sup>2</sup> (IBGE, 2002). Na divisa com os Estados de Sergipe e Bahia é banhado pelo Rio São Francisco. Na porção norte faz divisa com Estado de Pernambuco.

Para fins de análise e interpretação dos dados é conveniente utilizar a antiga divisão do Estado de Alagoas em mesorregiões: leste, agreste e sertão alagoano, uma vez que a mesma possui características adequadas para o presente estudo.

### **3.2 Coleta das amostras**

Foram coletadas 41 amostras no Estado espaçadas a aproximadamente 25 a 30 km umas das outras, onde os pontos de coletas foram estabelecidos pela intercessão de linhas de longitude e latitude formando uma malha regular, conforme mostrado na Figura 3.1.

As amostras foram coletadas pela equipe da CPRM de Pernambuco no âmbito do Projeto PGAGEM BRASIL nos primeiros 25 cm, nas faixas onde o solo era mais espesso, em áreas cultivadas do(s) principal(is) produto(s) agrícola(s) do município e em áreas não cultivadas. Nos locais com pequena ou nenhuma atividade agrícola, foram coletadas as amostras de solo nas áreas de agricultura de subsistência familiar. A localização foi aleatória dentro das áreas cultivadas (CPRM, 2003).

As amostras foram etiquetadas e numeradas constando na mesma as coordenadas dos pontos de coleta, que foram obtidas por meio de GPS. Nos pontos georeferenciados, foram coletados de 2 a 3 kg solo que foram peneirados em campo na fração 60 mesh (peneira de nylon).

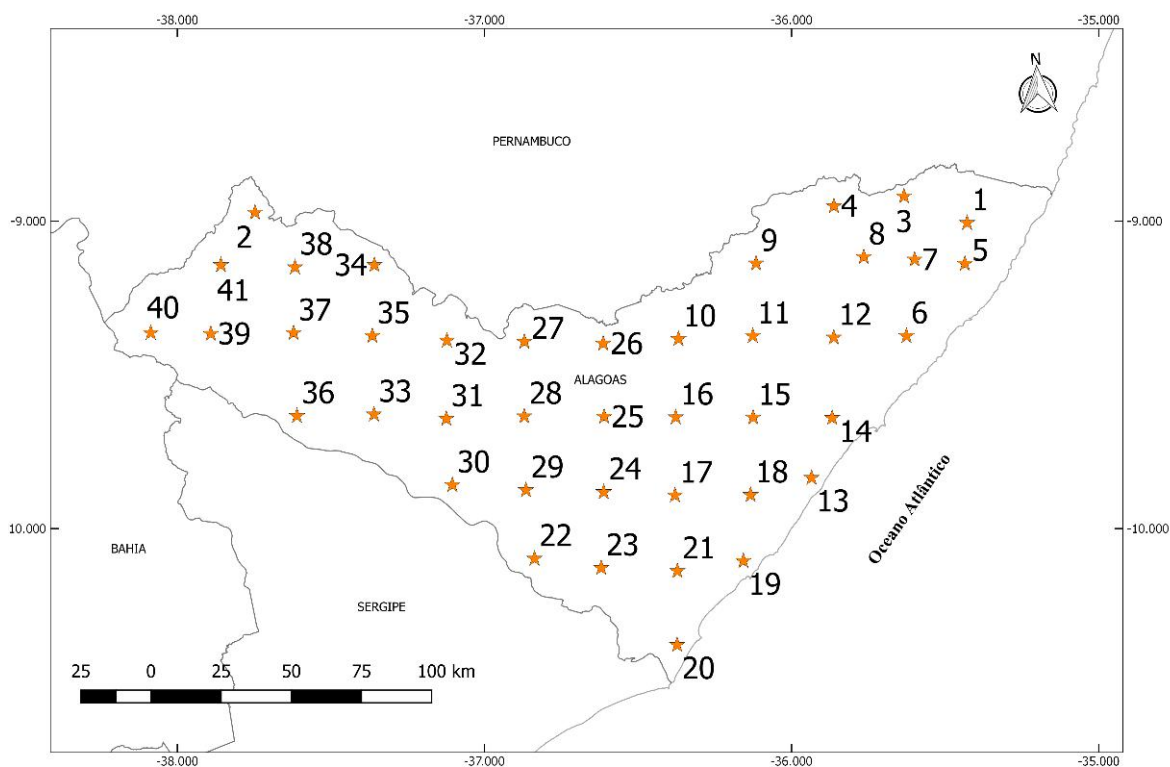


Figura 3.1 Distribuição dos locais de coleta das amostras no Estado de Alagoas

### 3.3 Preparação das amostras

As amostras foram novamente peneiradas em laboratório agora com trama de 230 mesh (CPRM, 2003). Ou seja, 63  $\mu\text{m}$  foi a granulometria máxima das amostras de solo. Cada uma das amostras foi registrada numa ficha de campo de amostra geoquímica, tendo os parâmetros de localização e descritivos do local de coleta, anotadas as características próprias do local da amostragem. As características do local da amostragem foram repassadas para a matriz de dados, tais como: a pluviosidade próxima da coleta (período seco, chuvas esparsas e chuvas fortes recentes); tipo de vegetação (terras cultivadas/pastagens, cerrado, mangue, caatinga/agreste) e coordenadas geográficas.

As amostras foram enviadas para o IRD, onde foram devidamente preparadas. Aproximadamente 300g de amostra de solo foram acondicionadas em potes polietileno de 300 ml, seladas e revestidas em papel alumínio (Figura 3.2). Após o selamento as amostras foram deixadas em repouso por, pelo menos, 30 dias para atingirem o equilíbrio



secular necessário para a realização das medidas de  $^{226}\text{Ra}$ .



Figura 3.2 Amostras de solos seladas

### 3.4 Método analítico

As atividades específicas (concentração) das amostras foram medidas por meio de espectrometria gama em detectores de germânio hiperpuro (HPGe) projetados pela Canberra Inc. (Meriden, CT, USA). Os detectores (gc2020, poço, gx45a e gx100) de HPGe e seus respectivos dispositivos eletrônicos (fontes HV, amplificadores, analisador multicanal) do Laboratório de Radiometria Ambiental, da Divisão de Radioproteção Ambiental e Ocupacional (DIRAD), do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN) foram utilizados para a medida da atividade específica de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{Cs}$  nas amostras de solo.

Os referidos detectores possuem blindagem individual feita de chumbo antigo de 15 cm de espessura e camada de cobre de 2 mm, produzido também pela Canberra Inc. Os detectores utilizados para as medidas gc2020, poço, gx45a e gx100 possuem eficiência relativa de 20%, 25%, 40% e 100% respectivamente.

As atividades específicas das amostras e suas respectivas incertezas foram determinadas por meio da área do fotopico do respectivo radionuclídeo fornecida pelo *software* Genie2000 da Canberra Inc.

A atividade específica do  $^{228}\text{Ra}$  foi medida por meio dos fotopicos gama de 338,3 keV, 911,6 keV e 969,1 keV do  $^{228}\text{Ac}$  (BÉ *et al.*, 2010). Já a atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$

foi determinada por meio dos fotopicos de gama de 351,9 keV do  $^{214}\text{Pb}$  e de 609,3 keV do  $^{214}\text{Bi}$ . A atividade específica do  $^{40}\text{K}$  foi obtida por meio do seu fotopico de 1.460,8 keV e a do  $^{137}\text{Cs}$  pelo seu fotopico característico de 661,6 keV.

As amostras foram igualmente medidas pelo período de 60.000 segundos. A fim de se diminuir a incerteza, o *background* do sistema foi medido pelo tempo de 230.000 segundos.

A calibração em eficiência dos detectores foi realizada na geometria do pote de 300 ml com um padrão em solução de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) contendo vários radionuclídeos ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{241}\text{Am}$ ), fornecido pelo Laboratório Nacional de Metrologia de Radiação Ionizantes (LNMRI) pertencente ao IRD/CNEN. O LNMRI é o laboratório brasileiro de metrologia de radiação, rastreado pelo *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), na França.

A calibração em energia dos detectores utilizados no presente estudo foi rotineiramente realizada por meio de uma fonte de  $^{152}\text{Eu}$ . A fim de se garantir a qualidade das medidas, um padrão de solo certificado (089/ERA), fornecido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), foi analisado como uma amostra cega durante a medida das amostras.

De forma rotineira, o desempenho do Laboratório de Radiometria Ambiental da DIRAD-IRD foi avaliado pela participação nos exercícios de intercomparação do programa de avaliação de desempenho denominado ALMERA (*Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity*), coordenado pela Agência Internacional de Energia Atômica. Além disso, o Laboratório também participa nos exercícios de intercomparação brasileiros oferecido pelo LNMRI/IRD. Os resultados dos referidos exercícios apontaram um bom desempenho para o laboratório.

### **3.5 Sistema de informação geográfica**

O Sistema de Informação Geográfica (SIG ou GIS) foi utilizado para identificar os pontos amostrais nos diversos mapas utilizados e extrair informações úteis para serem inseridas na matriz de dados. Os mapas utilizados do Estado de Alagoas no presente trabalho foram: mapa de solo (EMBRAPA SOLOS, 2011) no formato *shapefile* (Shp), na escala de 1:100.000; mapa da geodiversidade na escala de 1:250.000 (CPRM, 2015) e mapa de relevo (IBGE, 2002). O mapa da malha de municípios, mapa das mesorregiões

e uso dos solos (SUPERINTENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DA INFORMAÇÃO E DO CONHECIMENTO, 2015), todos em formato Shp, foram disponibilizados pela Superintendência de Produção da Informação e do Conhecimento da Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio do Estado de Alagoas (SEPLAG).

O formato *shapefile* é um formato popular de arquivo contendo dados geoespaciais em forma vetorial usado pelo Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

As coordenadas geográficas dos 41 pontos de amostragem foram carregadas para *software* livre Qgis v.2.18.15, onde a localização dos pontos em cada mapa foi realizada. A localização dos pontos amostrais de acordo com os tipos de solo, geologia, municípios, etc foi realizada por meio da superposição dos mapas com as amostras e suas características inserida em uma tabela, formando uma matriz de dados. As informações armazenadas na matriz de dados foram as seguintes:

- localização – município e mesorregião;
- geodiversidade – unidade, hierarquia, aspecto, intemperismo físico, intemperismo, químico, litotipo-1, litotipo-2, classe de rocha, unidade geológica e domínio;
- relevo – tipo de relevo, amplitude e declividade;
- solo – tipo de solo primeiro e segundo nível categórico e ocupação do solo;
- concentração – atividade específica de cada um dos radionuclídeos estudados, seu respectivo erro e AMD.

### **3.6 Solos amostrados**

Segundo (EMBRAPA SOLOS, 2012) os cinco tipos de solo de maior prevalência no Estado de Alagoas são, em ordem decrescente: Argilossolos Amarelos; Planossolos Háplicos; Neossolos Litólicos; Argissolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Amarelos. Somente esses cinco tipos de solos correspondem a praticamente 70% da área do Estado de Alagoas.

A distribuição regularmente espaçada na coleta das amostras no Estado de Alagoas contribuiu para uma boa distribuição das amostras entre os principais tipos de solo do Estado. Os tipos de solos mais prevalentes no Estado foram bem representados na amostragem realizada. Com exceção do Neossolos Regolíticos que houve uma amostragem maior que a prevalência, os demais solos foram bem representados inclusive respeitando a ordem de prevalência.

A Tabela 3.1 mostra o número de amostras de cada tipo de solo, seguida da representação da porcentagem das amostras por tipo de solo e, na última coluna, a comparação com a porcentagem de solos presentes no Estado de Alagoas, segundo a (EMBRAPA SOLOS, 2012).

Tabela 3.1 Comparação entre a quantidade de amostras por tipo de solo e a prevalência de solos no Estado de Alagoas

<b>Classes de Solos</b>	<b>Nº de Amostra</b>	<b>% do total das amostras</b>	<b>% Estado de Alagoas</b>
ARGISSOLOS AMARELOS	8	19,51	17,79
ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS	5	12,19	12,48
CAMBISSOLOS FLÚVICOS	1	2,44	0,38
GLEISSOLOS HÁPLICOS	1	2,44	3,75
LATOSSOLOS AMARELOS	3	7,31	8,01
LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS	1	2,44	1,21
NEOSSOLOS REGULÍTICOS	6	14,63	6,41
NEOSSOLOS	6	14,63	15,48

LITÓLICOS			
NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS	1	2,44	1,23
NEOSSOLOS FLÚVICOS	1	2,44	2,03
PLANOSSOLOS HÁPLICOS	7	17,07	15,53
Solos Indiscriminados de Mangues	1	2,44	0,24
Total	41	100	84,54

Observa-se que as amostras coletadas representam 84,54% dos solos presentes no Estado de Alagoas, sendo a amostragem representativa dos tipos de solos.

### 3.7 Confeção dos mapas radiológicos

Os valores de concentração para cada radionuclídeo e a taxa de dose no ar a um metro também foram carregados para o Qgis, onde foi possível criar os mapas radiológicos de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ , assim como o mapa de taxa de dose no ar. Para isso, foi utilizado o método de interpolação do Kriging, comum para todo o conjunto de resultados.

### 3.8 Análise estatística

A análise estatística da matriz de dados foi realizada por meio dos *softwares IBM SPSS Statistics* <sup>22.0</sup>, *ProUCL* <sup>5.1.002</sup> e *Excel* <sup>2016</sup>. A matriz de dados foi construída no *software Excel 2016*, onde cada linha da tabela representa uma amostra, tendo cada coluna uma característica da amostra como: localização, clima, geodiversidade, pedologia, agrupamento das amostras e atividade específica dos radionuclídeos de interesse ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{Cs}$ ).

Assim, primeiramente realizou-se a estatística descritiva da concentração para cada radionuclídeo, sem correlacionar com qualquer outra característica da amostra.

Foram feitos histogramas a fim de analisar a distribuição das concentrações. Além disso, testes estatísticos de normalidade foram realizados utilizando-se o *software IBM SPSS Statistics*. O teste para a verificação da normalidade foi o Shapiro-Wilk. Quando se busca conhecer a normalidade de uma distribuição com tamanho amostral menor que 50 o teste de Shapiro-Wilk é mais apropriado que o teste de Kolmogorov-Smirnov (GHASEMI; ZAHEDIASL, 2012).

A fim de apresentar a estatística para o  $^{137}\text{Cs}$  foi realizado um *boxplot* com as seis amostras com atividade acima da AMD. Tendo em vista a grande quantidade de dados abaixo da AMD, foi realizado tratamento estatístico na AMD. Inicialmente foi feita a identificação de *outliers* na AMD do  $^{137}\text{Cs}$  por meio do *software* ProUCL. A fim de se estimar um valor de referência da concentração de  $^{137}\text{Cs}$  no Estado a AMD foi também dividida pela metade e realizada a estatística descritiva.

A fim de se identificar padrões de distribuição da concentração dos radionuclídeos, a análise estatística foi iniciada utilizando-se o *software IBM SPSS Statistics* para a construção dos Dendrogramas para a distribuição atividade específica de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  a fim de se identificar grupos. Foi realizado ainda a correlação entre  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  e a correlação do  $^{40}\text{K}$  com o  $^{226}\text{Ra}$  e com o  $^{228}\text{Ra}$  para todas as amostras, onde foi obtida a equação da reta ajustada e o coeficiente de correlação. O mesmo procedimento foi repetido, separando as amostras entre as três mesorregiões (leste, agreste e sertão).

A análise estatística classificando-se a amostra para cada tipo de solo também foi realizada por meio do *software IBM SPSS Statistics*. Foram realizados *boxplots* para cada radionuclídeo natural a fim de se verificar a distribuição de dados e se identificar *outliers*.

O segundo passo foi verificar a existência de diferença estatística entre a distribuição de concentração para cada radionuclídeo natural em cada tipo de solo, utilizando o teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney. Em seguida foi realizada a estatística descritiva para os radionuclídeos que apresentaram diferenças significativas pelo teste de Mann-Whitney.

Foi realizada ainda a análise estatística para a comparação entre as mesorregiões do Estado de Alagoas.

## Capítulo 4 Resultados e Discussões

Na tabela 4.1 é mostrado o banco de dados com as concentrações dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{Cs}$ , assim como a sua localização em coordenadas geográficas. A partir dessa matriz de dados foram realizadas as estatísticas descritivas para todas as amostras. Na sequência, os resultados das concentrações para cada radionuclídeo foram comparados com a literatura.

Buscou-se também agrupar as amostras pelo valor da concentração dos radionuclídeos, a fim de se verificar a correlações com diversos fatores ambientais ligados principalmente à pedologia e ao uso do solo. Foram identificadas algumas predominâncias relacionando os grupos com alguns fatores ambientais como tipo de solo e mesorregião para o  $^{40}\text{K}$ . Entretanto, as correlações das características ambientais como o valor da concentração foram mais adequadas, pois permitiu identificar uma maior quantidade de correlações. Dessa forma, no presente estudo procurou-se analisar a correlação da concentração dos radionuclídeos naturais  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  como os principais tipos de solo, uso do solo e mesorregiões (que foram as características ambientais que apresentaram correlação com a concentração dos radionuclídeos). Testes de hipótese foram aplicados a fim de apontar quais diferenças nas distribuições de atividades desses radionuclídeos são significativas para cada tipo de solo.

Tendo em vista as características e comportamento do  $^{137}\text{Cs}$  e, principalmente, pelo fato de ser um elemento artificial, a sua ocorrência no Estado de Alagoas é provavelmente proveniente de precipitação radioativa e, por isso, com poucas amostras acima da AMD. Ante ao exposto, a análise do  $^{137}\text{Cs}$  foi realizada apartada da análise dos radionuclídeos de ocorrência natural.

Neste capítulo, serão ainda apresentados os primeiros mapas de distribuição da concentração dos radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  para o Estado de Alagoas. Por fim, será calculada a estimativa de dose externa a que a população do Estado está exposta e seu respectivo risco, proveniente dos principais radionuclídeos naturais presentes no solo. Será mostrado também o mapa de dose no ar a um metro para todo Estado de Alagoas.

Amostra	Latitude	Longitude	40K (Bq Kg <sup>-1</sup> )			226Ra (Bq Kg <sup>-1</sup> )			228Ra (Bq Kg <sup>-1</sup> )			137Cs (Bq Kg <sup>-1</sup> )		
			Atividade Específica	Incerteza AMD	Atividade Específica	Incerteza AMD	Atividade Específica	Incerteza AMD	Atividade Específica	Incerteza AMD	Atividade Específica	Incerteza AMD	Atividade Específica	Incerteza AMD
1	-9° 0' 21"	-35° 25' 44"	546,9	24,12	11,6	33,82	1,63	1,85	51,81	2,16	2,16	2,16	1,17	
2	-8° 58' 20"	-37° 44' 50"	842,3	32,53	7,98	13,94	0,74	1,41	26,34	1,11	2,45	2,45	0,80	
3	-8° 55' 9"	-35° 38' 4"	413,9	17,43	3,67	34,59	1,54	1,13	26,45	1,1	1,25	0,46	0,32	
4	-8° 57' 5"	-35° 51' 45"	33,42	2,7	4,95	53,17	2,4	1,22	43,53	1,57	1,24	1,24	0,71	
5	-9° 8' 19"	-35° 26' 10"	25,42	4,41	10,5	31,62	1,38	2,12	121,5	4,16	2,78	2,78	1,28	
6	-9° 22' 25"	-35° 37' 35"	141,8	8,5	10,7	30,96	1,55	2,44	34,86	1,81	4,21	4,21	1,66	
7	-9° 7' 30"	-35° 35' 59"	1127	45,88	4,71	29,06	1,29	1,31	55,64	1,98	1,43	1,43	0,71	
8	-9° 6' 60"	-35° 45' 55"	166,8	8,68	10,4	55,69	2,11	1,89	83,63	2,95	1,96	1,96	0,58	
9	-9° 8' 16"	-36° 6' 57"	43,92	4,94	11,9	41,92	4,19	2,1	116,9	3,88	3	3	1,37	
10	-9° 22' 60"	-36° 22' 7"	1050	40,4	9,96	34,42	1,5	1,72	65,53	2,53	2,12	2,12	0,65	
11	-9° 22' 24"	-36° 7' 36"	269,9	11,9	8,65	24,97	1,04	1,38	25,31	1,08	2,48	2,48	0,41	
12	-9° 22' 42"	-35° 51' 46"	98,13	6,06	9,49	41,63	1,61	1,65	39,05	1,53	2,56	2,56	0,90	
13	-9° 50' 5"	-35° 56' 7"	6,47	1,23	3,34	9,74	0,5	0,84	17,21	0,67	0,74	0,74	0,24	
14	-9° 38' 25"	-35° 52' 6"	28,48	3,95	10,2	29,23	1,37	1,73	72,54	2,6	2,46	2,46	0,71	
15	-9° 38' 19"	-36° 7' 31"	7,73	2,96	9,09	14,18	0,73	1,45	30,51	1,25	2,36	2,36	0,85	
16	-9° 38' 16"	-36° 22' 38"	4,21	2,75	8,77	10,83	0,62	1,22	23,17	1,09	1,62	1,62	0,81	
17	-9° 53' 30"	-36° 22' 47"	3,13	2,47	7,98	10,32	0,61	1,33	23,89	1,09	2,16	2,16	0,70	
18	-9° 53' 26"	-36° 8' 2"	44,05	4,11	9,03	25,98	1,1	1,4	69,43	2,41	2,27	2,27	0,92	
19	-10° 6' 19"	-36° 9' 26"	5,76	1,21	3,38	15,59	0,78	0,86	19,02	0,74	0,98	0,98	0,22	

Tabela 4.1. Banco de dados com as concentrações dos radionuclídeos <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>137</sup>Cs no Estado de Alagoas



20	-10° 22' 43"	-36° 22' 22"	19,53	2,67	6,8	5,05	0,38	0,96	9,49	0,53	1,36	0,37
21	-10° 8' 17"	-36° 22' 19"	11,22	2,75	8,02	11,54	0,61	1,21	29,14	1,16	2,13	0,52
22	-10° 5' 52"	-36° 50' 14"	422,5	17,62	9,3	12,76	0,74	1,26	25,51	1,12	2,1	0,66
23	-10° 7' 41"	-36° 37' 12"	504,2	31	25,4	29,70	2,32	4,63	49,64	3,16	6,87	3,39
24	-9° 52' 52"	-36° 36' 42"	29,32	3,52	8,66	29,21	1,15	1,41	43,41	1,6	1,92	0,46
25	-9° 38' 10"	-36° 36' 37"	371,5	15,91	10,4	18,30	0,93	1,77	103,1	3,48	2,57	1,14
26	-9° 23' 53"	-36° 36' 48"	234,9	11,11	10,7	41,68	1,64	1,95	104,1	3,53	2,62	1,19
27	-9° 23' 32"	-36° 52' 12"	801,6	31,33	10,8	45,20	1,92	2,61	59,33	2,39	3,24	1,73
28	-9° 38' 6"	-36° 52' 14"	990,7	38,1	9,44	31,43	1,3	1,74	75,07	2,59	2,52	1,08
29	-9° 52' 30"	-36° 51' 54"	1379	52,53	10,8	32,36	1,53	2,24	157,4	5,0	3,05	0,65
30	-9° 51' 29"	-37° 6' 16"	142,3	8,11	10,2	15,96	0,85	1,52	20,3	1,08	1,78	0,63
31	-9° 38' 34"	-37° 7' 27"	1182	45,29	11	63,46	2,37	2,2	128	4,24	3,01	1,37
32	-9° 23' 18"	-37° 7' 20"	1620	59,66	10,4	35,40	1,64	2,54	28,5	1,49	4,09	1,66
33	-9° 37' 43"	-37° 21' 35"	2160	80,9	10,6	31,60	1,34	2,15	100,9	3,47	4,02	1,34
34	-9° 8' 34"	-37° 21' 30"	1031	39,78	9,95	27,67	1,19	1,68	23,78	1,16	2,58	0,99
35	-9° 22' 24"	-37° 21' 54"	1356	51,38	8,82	32,55	1,29	1,63	43,81	1,77	2,7	1,02
36	-9° 38' 1"	-37° 36' 38"	1132	4,61	4,48	26,98	1,33	1,06	51,61	1,78	1,4	0,71
37	-9° 21' 50"	-37° 37' 18"	1172	44,12	10,4	38,09	1,62	2,3	48,81	1,97	3,28	1,71
38	-9° 8' 60"	-37° 37' 1"	1475	55,94	9,98	26,28	1,12	1,88	59,1	2,12	3,49	1,13
39	-9° 21' 59"	-37° 53' 28"	1533	62,6	4,76	14,285	0,83	1,16	31,54	1,22	1,97	0,35
40	-9° 21' 48"	-38° 5' 11"	1531	57,54	7,65	14,675	0,72	1,32	16,22	0,93	2,69	0,84
41	-9° 8' 34"	-37° 51' 29"	1738	65,16	8,32	19,62	0,89	1,48	41,85	1,57	2,43	0,96

Tabela 4.1 Banco de dados com as concentrações dos radionuclídeos 40K, 226Ra, 228Ra e 137Cs no Estado de Alagoas

## 4.1 Estatísticas descritivas

### 4.1.1 Resultados para o $^{40}\text{K}$

Das 41 amostras analisadas apenas duas apresentaram concentração de  $^{40}\text{K}$  abaixo da atividade mínima detectável (AMD). O valor mínimo de concentração encontrada no Estado de Alagoas foi de  $6 \pm 1$  Bq/kg e o máximo foi  $2.160 \pm 81$  Bq/kg. A média aritmética das amostras coletadas ficou em  $630 \pm 25$  Bq/kg e a média geométrica em  $250 \pm 25$  Bq/kg.

A Figura 1.1 mostra o histograma com a distribuição do número de amostra entre cinco intervalos de concentração de  $^{40}\text{K}$  pré-definidos. Pouco mais da metade das amostras tiveram suas concentrações localizadas no intervalo entre 0 e 440 Bq/kg, sendo a mediana  $420 \pm 25$  Bq/kg. Segundo (UNSCEAR, 2000), a mediana mundial de concentração de  $^{40}\text{K}$  em solos é de 400 Bq/kg, com variação entre 140 e 850 Bq/kg (UNSCEAR, 2000).

A distribuição dos resultados mostrou-se bastante assimétrica, como pode ser notado pelo valor da assimetria de Pearson (1,12). Valores de assimetria de Pearson fora do intervalo entre -1 a +1 demonstram uma distribuição fortemente assimétrica. Outrossim, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk forneceu um valor de  $p=0$  ( $p<0,05$ ) confirmando a hipótese alternativa de que não se trata de uma distribuição normal.

Considerando a média geométrica 250 Bq/kg o valor da concentração fica abaixo do valor da mediana mundial de acordo com o valor publicado pela (UNSCEAR, 2000). Das 39 amostras que tiveram o valor de atividade acima da AMD, 24 tiveram suas concentrações no intervalo entre 0 e 880 Bq/kg correspondente a aproximadamente as concentrações de  $^{40}\text{K}$  mais encontradas nos solos de todo o mundo. Entretanto, 15 amostras apresentaram concentração acima dos valores típicos dos solos.

Se consideramos todas as amostras, inclusive as que tiveram valores abaixo da AMD, a fração de amostras com  $^{40}\text{K}$  acima do normalmente encontrado em solos no mundo foi de aproximadamente 37 %.

Tendo em vista os altos valores de concentração para o  $^{40}\text{K}$  encontrado em algumas amostras, os valores do percentil 75 para todas amostras de solo ficou em 1.172 Bq/kg e do percentil 90 em 1.533 Bq/kg.

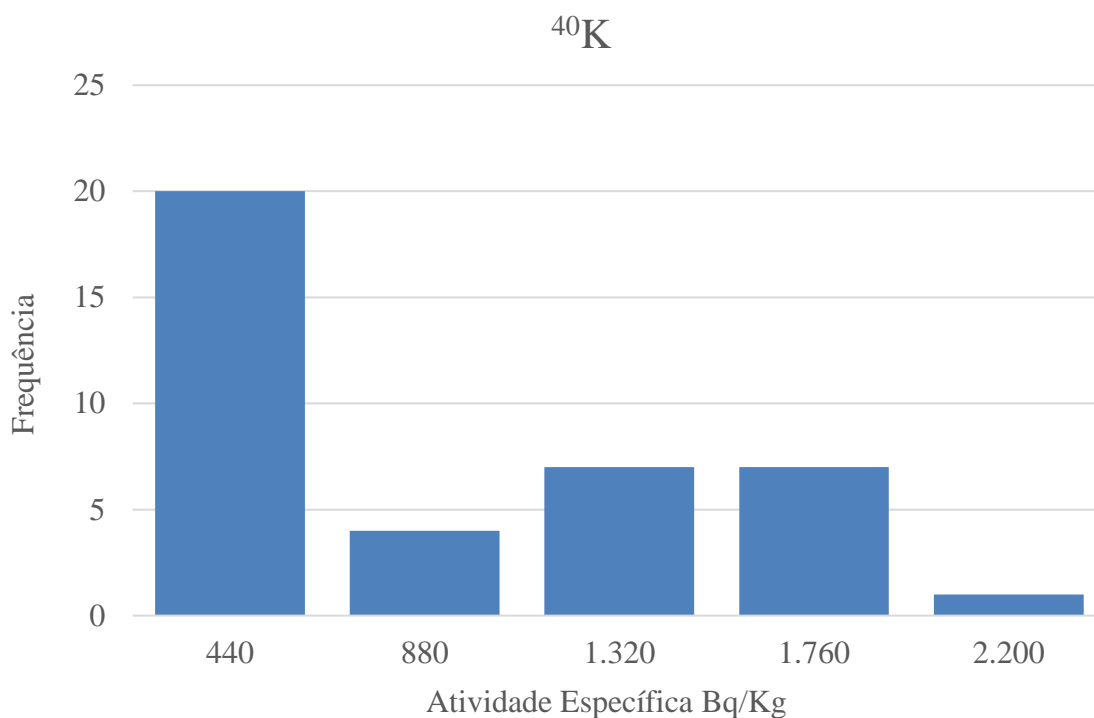


Figura 4.1 Histograma mostrando a distribuição de frequências de concentração de  $^{40}\text{K}$  encontradas em todas as amostras do Estado de Alagoas

#### 4.1.2 Resultados para o $^{226}\text{Ra}$

No caso da  $^{226}\text{Ra}$ , todas as amostras apresentaram concentração acima da AMD. A distribuição dos valores de atividade específica se aproxima de uma distribuição normal. O teste de Shapiro-Wilk forneceu um valor de  $p=0,131$ , ou seja,  $p>0,05$ , confirmando a hipótese nula de que se trata de uma distribuição normal.

O intervalo de valores de atividade específica para o  $^{226}\text{Ra}$  ficou entre  $5,0 \pm 0,4$  Bq/kg a  $63 \pm 2$  Bq/kg. A média ficou em  $28 \pm 1$  Bq/kg e a sua média geométrica em  $24 \pm 1$ . A mediana em  $29 \pm 1$  Bq/kg e o percentil 75 em 34 Bq/kg e o percentil 90 em 44 Bq/kg. Os valores encontrados para  $^{226}\text{Ra}$  estão de acordo com a faixa de valores reportadas como de ocorrência natural no mundo, uma vez que a (UNSCEAR, 2000) relata o valor da mediana no mundo de 35 Bq/kg.

A Figura 4.2 mostra a distribuição de frequências de atividade específica de  $^{226}\text{Ra}$  em 7 faixas de concentração. A maior ocorrência das amostras ficou na faixa de atividade

entre 25 a 34 Bq/kg. A assimetria de Person forneceu valor de -0,29 o que demonstra uma assimetria moderada (valores  $0,15 < \|Assimetria\| < 1$  indicam uma assimetria moderada). A distribuição pode ser considerada normal de acordo com o teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

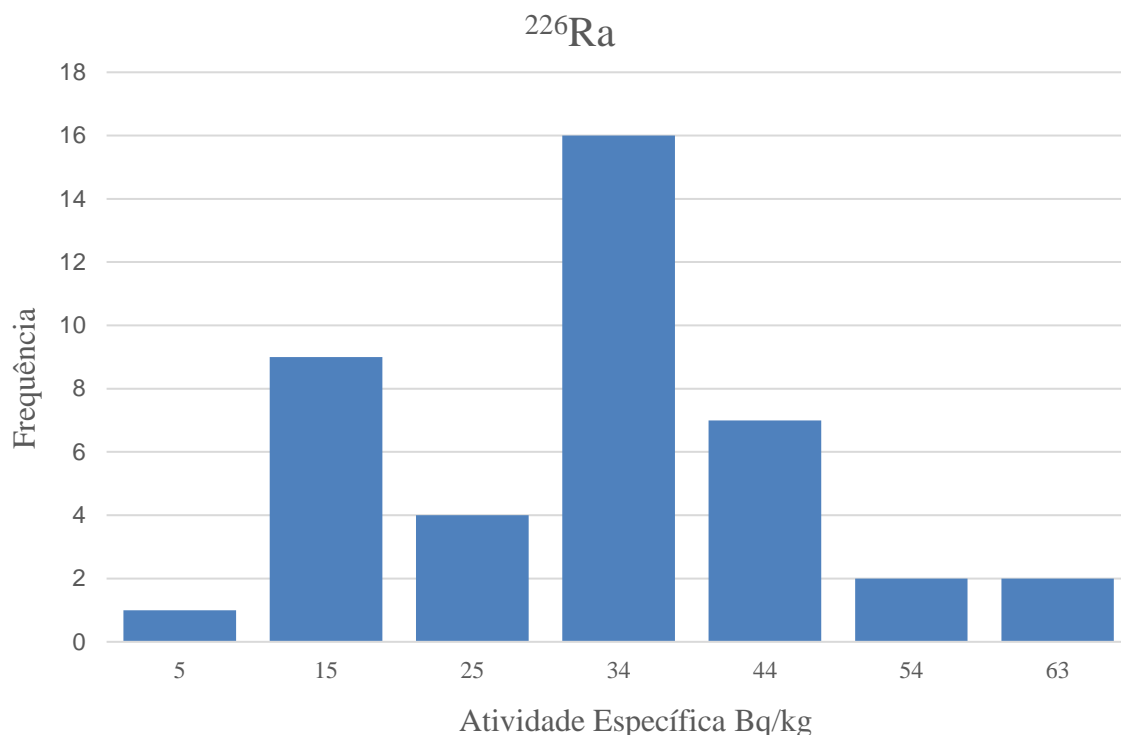


Figura 4.2 Histograma mostrando a distribuição de frequências de concentração de  $^{226}\text{Ra}$  encontradas em todas as amostras de solo em estudo

#### 4.1.3 Resultados para o $^{228}\text{Ra}$

O intervalo da concentração medidas para o  $^{228}\text{Ra}$  ficou entre  $9,5 \pm 0,5$  Bq/kg e  $157 \pm 5$  Bq/kg e a média aritmética ficou em 54 Bq/kg. Como se pode perceber a média dos valores de concentração para o  $^{228}\text{Ra}$  ficaram maiores que a do  $^{226}\text{Ra}$ . Entretanto, essa diferença dos valores de concentração já era esperada, uma vez que os solos brasileiros, em geral, apresentam teores de tório superiores aos de urânio. Portanto, há uma tendência das medidas de concentração em solo brasileiro apresentarem teores  $^{228}\text{Ra}$  maiores que os de  $^{226}\text{Ra}$  (LINSALATA *et al.*, 1988; PFEIFFER *et al.*, 1981).

Os percentis 75 e 90 de concentração para o  $^{228}\text{Ra}$  ficaram em 71 e 114 Bq/kg respectivamente.

Da análise da Figura 4.3 podemos perceber que a distribuição dos valores de concentração é assimétrica. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk forneceu um valor de  $p=0$ , ( $p<0,05$ ) confirmando a hipótese alternativa de que não se trata de uma distribuição normal.

Os valores de concentração de  $^{228}\text{Ra}$  ficaram ligeiramente acima dos valores encontrados em solos pelo mundo, ou seja, de 11 a 64 Bq/kg, sendo a mediana de 30 Bq/kg (UNSCEAR, 2000). Como a distribuição não é normal, utilizou-se como parâmetro de comparação apenas a média geométrica 44 Bq/kg (que possui valor pouco abaixo da média aritmética). Mesmo considerando a média geométrica as estatísticas mostram ainda valores altos.

Das 41 amostras analisadas, 13 apresentaram valores acima da mediana mundial, 30Bq/kg (UNSCEAR, 2000), o que corresponde a 32% das amostras para o  $^{228}\text{Ra}$ .

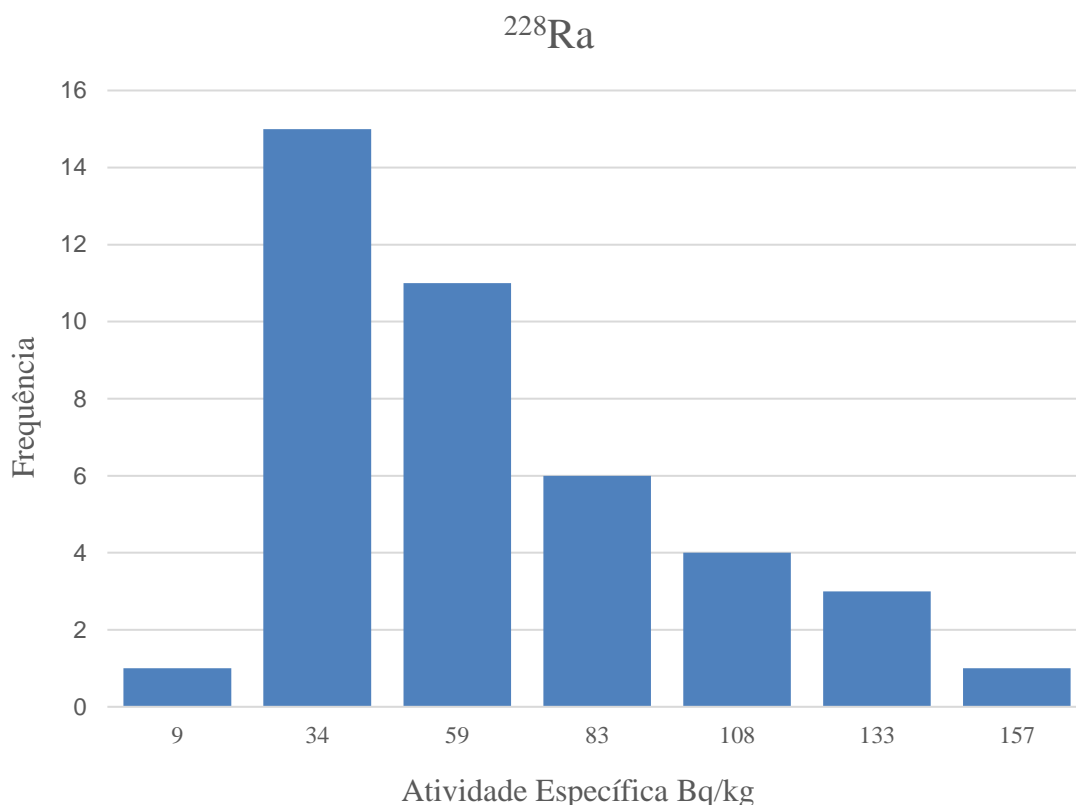


Figura 4.3 Histograma mostrando a distribuição de frequências de concentração de  $^{228}\text{Ra}$  encontradas em todas as amostras de solo em estudo

#### 4.1.4 Resultados para o $^{137}\text{Cs}$

Das 41 amostras analisadas apenas seis apresentaram concentração de  $^{137}\text{Cs}$  acima da AMD o que corresponde a 15% das amostras de solo, conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Valores de concentração de  $^{137}\text{Cs}$  acima da AMD

Identificação da Amostra	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)	Incerteza	AMD (Bq/kg)
3	0,46	0,08	<0,32
11	0,47	0,10	<0,41
13	0,30	0,08	<0,24
14	1,13	0,46	<0,71
22	0,66	0,20	<0,59
24	0,46	0,10	<0,43

Os valores encontrados acima da AMD variam de  $0,30 \pm 0,08$  Bq/kg a  $1,13 \pm 0,46$  Bq/kg. A média aritmética das atividades específicas das seis amostras ficou em  $0,58 \pm 0,17$  Bq/kg e a média geométrica em  $0,53 \pm 0,13$  Bq/kg. A Figura 4.4 abaixo, no formato *boxplots*, mostra a estatística da concentração das seis amostras que forneceram valor de atividade acima da AMD. O limite inferior da caixa mostra o primeiro quartil (0,42 Bq/kg) e o limite superior o terceiro quartil (0,78 Bq/kg). O valor de 1,13 Bq/kg foi considerado um *outlier*. A linha contínua no interior da caixa representa a mediana  $0,47 \pm 0,10$  Bq/kg. Como pode ser observado na Figura 4.4 a mediana se aproxima do primeiro quartil, além disso, a assimetria de Pearson é 1,24, mostrando uma distribuição fortemente assimétrica.

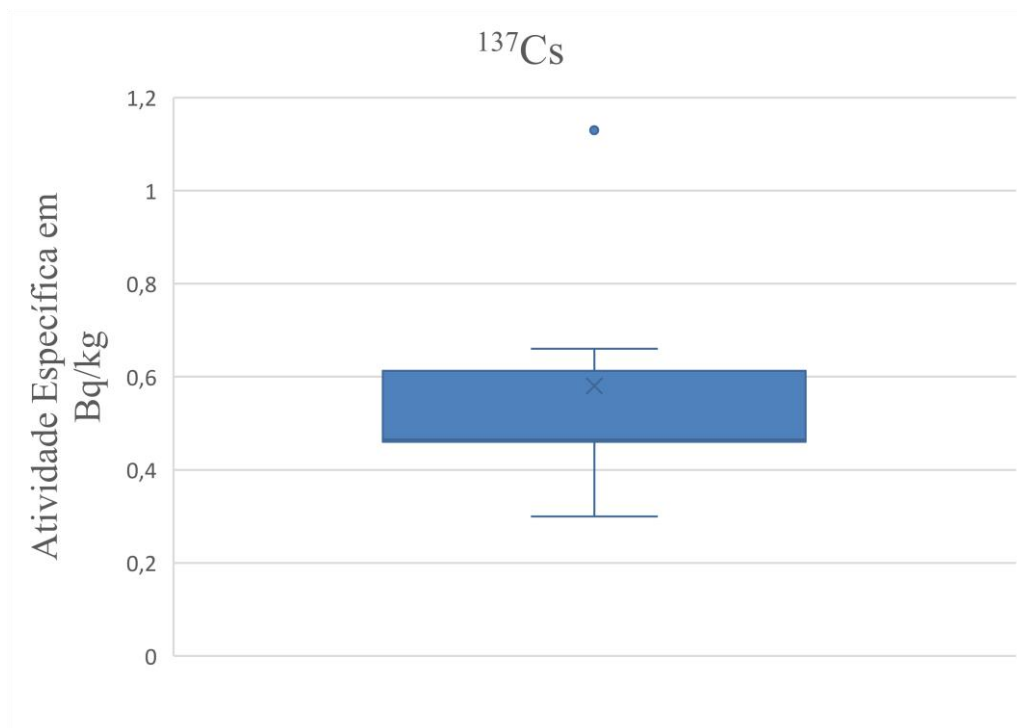


Figura 4.4 O diagrama *boxplot* com a variação de concentração de  $^{137}\text{Cs}$

A fim de facilitar a visualização dos resultados estatísticos encontrados para os radionuclídeos naturais e  $^{137}\text{Cs}$  para todo o Estado de Alagoas os mesmos são sumarizados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resumo estatístico da concentração em Bq/kg dos radionuclídeos objeto de presente estudo

Resumo Estatístico	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{228}\text{Ra}$	$^{137}\text{Cs}$
Média (Bq kg <sup>-1</sup> )	630 ± 25	28 ± 1	54 ± 2	0,58 ± 0,17
Mínimo (Bq kg <sup>-1</sup> )	6 ± 1	5.0 ± 0.4	9.5 ± 0.5	0,30 ± 0,08
Máximo (Bq kg <sup>-1</sup> )	2,160 ± 81	63 ± 2	157 ± 5	1,13 ± 0,46
Mediana (Bq kg <sup>-1</sup> )	420 ± 25	29 ± 1	43 ± 2	0,47 ± 0,10
Média Geométrica (Bq kg <sup>-1</sup> )	250 ± 25	24 ± 1	45 ± 2	0,53 ± 0,13
Desvio Padrão	630 ± 25	13 ± 1	35 ± 2	0,29 ± 0,15
Curtose	-0.93	0.18	0.78	3,12
Percentil (75) (Bq kg <sup>-1</sup> )	1,170 ± 25	34 ± 1	71 ± 2	0,61 ± 0,17
Percentil (90) (Bq kg <sup>-1</sup> )	1,530 ± 25	44 ± 1	114 ± 2	0,89 ± 0,33

## 4.2 Comparação dos resultados com a literatura

Os valores obtidos para o  $^{226}\text{Ra}$  estão de acordo com a média mundial, entretanto os valores encontrados para o  $^{228}\text{Ra}$  ficaram um pouco acima. Em relação ao  $^{40}\text{K}$  foram encontrados valores muito acima da média mundial. Os valores encontrados no sertão de Alagoas são tão alto quanto os valores máximos de  $^{40}\text{K}$  encontrados em vários países. Os valores encontrados para o  $^{137}\text{Cs}$  são compatíveis com os valores do hemisfério sul e do Brasil descritos na literatura.

A fim de promover a discussão dos resultados obtidos faz-se mister comparar os resultados com estudos semelhantes realizados no Brasil e no mundo.

### 4.2.1 Comparação da concentração do $^{40}\text{K}$

Com relação à concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$ , estudos realizados no agreste de Pernambuco, mais precisamente no município de Pedra, mostraram igualmente alta atividade para o  $^{40}\text{K}$  variando de 4,7 a 2.274 Bq/kg (SANTOS JÚNIOR, 2009). No presente trabalho a atividade variou de 6 a 2.160 Bq/kg. Esse estudo mostra uma ótima compatibilidade com os resultados aqui encontrados. O município de Pedra, situado na porção oeste do Planalto da Borborema, encontra-se a uma distância de aproximadamente 100 Km dos locais de amostragem com maior atividade no sertão de Alagoas.

Da mesma forma, os estudos realizados nos solos do Estado do Rio Grande do Norte, também no Nordeste brasileiro, mostraram variação da atividade de  $^{40}\text{K}$  de 56,4 e 1.972 Bq/kg com média de 517,2 Bq/kg (MALANCA, A., PESSINA, V., DALLARA, 1993), a maior concentração foi encontrada na região central do Estado, no Município de Santana do Matos, localidade com solo pedregoso, de clima semiárido, rios intermitentes e vegetação típica da Caatinga. O relevo do município está localizado na Depressão Sertaneja e de Paranaguá (assim como o sertão de Alagoas) tendo o Planalto da Borborema na porção leste do município de Santana do Matos.

Um estudo realizado na área de mineralização de U-ETR de São José dos Espinharas, na região central do Estado da Paraíba, mostra resultados para a atividade de  $^{40}\text{K}$  em vários horizontes de amostras de solos. O clima da região é semiárido, com chuvas irregulares. A vegetação do município é do tipo Caatinga, apresentando secas prologadas e rios intermitentes. Nesse estudo foram realizadas coletas em períodos secos e chuvosos.



A atividade de  $^{40}\text{K}$  se apresentou bastante elevada de 325 a 1.744 Bq/kg na estação seca e 315 a 1.721 Bq/kg na estação chuvosa (PAIVA, 2008). Como pode-se verificar a diferença entre a estação chuvosa e seca não apresentou grande variação. A maior variação, para o horizonte A, ficou em 35%, sendo o período seco o de maior atividade. Entretanto, na maioria das medidas a variação entre o período seco e chuvoso ficou em aproximadamente 5% para o horizonte A.

Da mesma forma que nos trabalhos anteriores (com exceção do Município de Pedra) São José dos Espinharas está localizada na Depressão Sertaneja e de Paranaguá, tendo o Planalto da Borborema na sua porção leste, conforme mostrado na Figura 4.5.

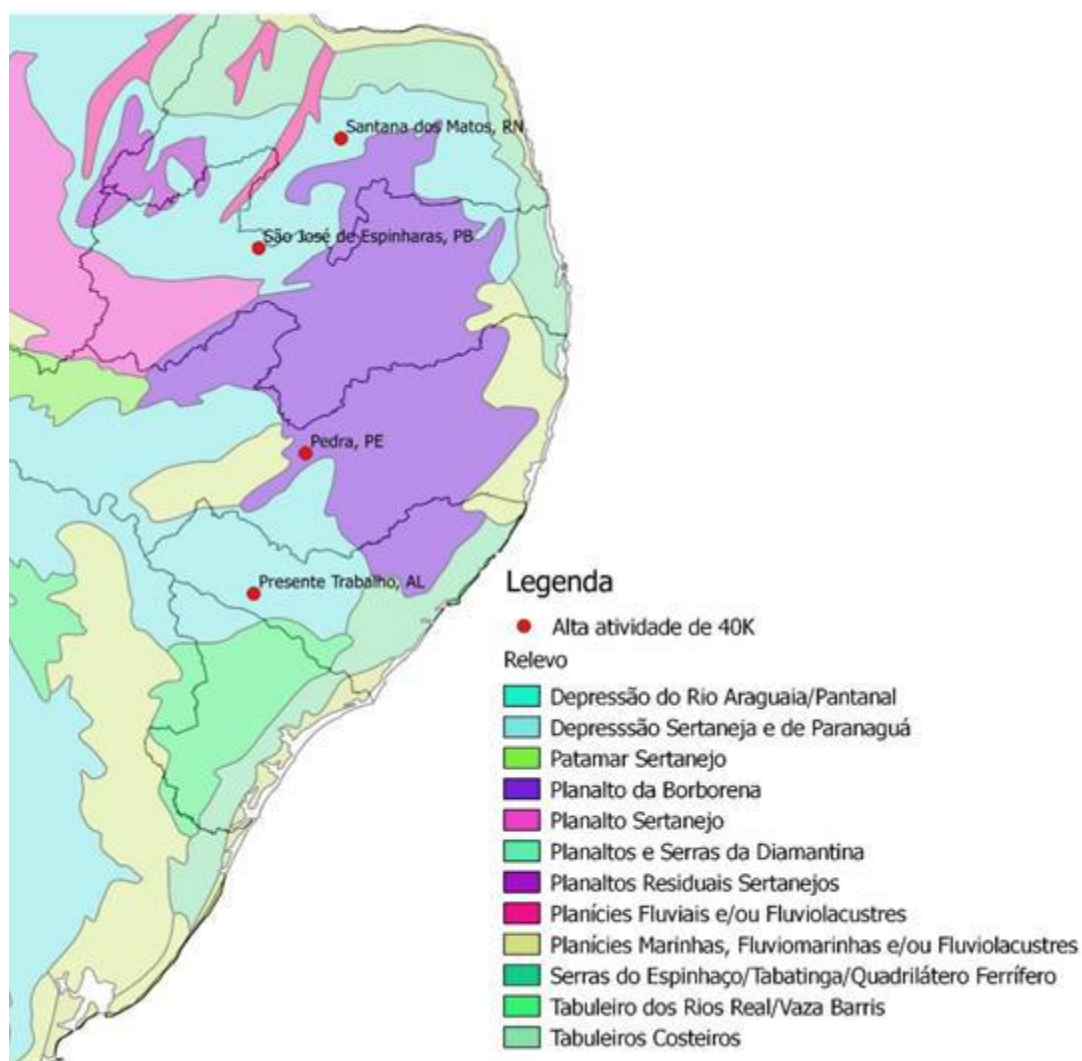


Figura 4.5 Locais com as mais altas concentrações de  $^{40}\text{K}$  reportados pela literatura na região Nordeste do Brasil

No Estado de Sergipe, estudos realizados no platô de Neópolis, região do litoral próxima as margens do Rio São Francisco, apresentaram atividade consideravelmente mais baixa de  $^{40}\text{K}$  variando de 0,11 a 112 Bq/kg, tendo como média 24,60 Bq/kg (CARDOSO, 2012). Esses valores de também estão de acordo com os resultados encontrados no presente trabalho para a mesorregião do leste Alagoano onde as concentrações de  $^{40}\text{K}$  foram consideravelmente mais baixas. Ambas regiões possuem características pedológica e geológicas semelhantes, ou seja, ambos pertencem à região dos tabuleiros costeiros de origem sedimentar. O tipo solo de Neópolis é predominantemente Argissolos Vermelho-Amarelos que apresentou concentração em Alagoas de  $^{40}\text{K}$  de 44,5 a 546,9 Bq/kg, conforme mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Atividade de  $^{40}\text{K}$  em várias regiões do Brasil adaptado de Ribeiro (2016)

<b>Região Estudada</b>	<b><math>^{40}\text{K}</math> (Bq/kg)</b>	<b>Referência Bibliográfica</b>
<b>Alagoas</b>	<b>6 a 2.160 (630)</b>	<b>(Presente Trabalho)</b>
Pernambuco	4,7 a 2.274	(SANTOS JÚNIOR, 2009)
Sergipe	0,11 a 112 (24,60)	(CARDOSO, 2012)
Rio Grande do Norte	56,4 e 1972 (517,20)	(MALANCA, A., PESSINA, V., DALLARA, 1993)
São Paulo	13 a 894 (121,28)	(CONCEIÇÃO, 2004)
São Paulo	15,3 a 516	(HIROMOTO, G., PERES, A. C., TADDEI, M. H., SOARES, M. R. & ALLEONI, 2007)
Ilha Grande, RJ	92 a 1114	(ALENCAR, A. S. & FREITAS, 2005)
Praias do Sudeste e Sul da Bahia	25 a 888	(VEIGA <i>et al.</i> , 2006)

Estado do Rio de Janeiro	12 a 1029 (111)	(RIBEIRO, 2016)
São José dos Espinharas, PB	325 a 1.744 (estação seca)* 315 a 1.721 (estação chuvosa)*	(PAIVA, 2008)
Solos agrícolas, SP	36 a 342	(UMISED0, 2007)
Mundo	140,00 a 850,00 (400)	(UNSCEAR, 2000)

\* Valores medidos nas mostras do horizonte  $A_p$

Os Valores entre parênteses representam a média e para o Mundo o valor entre parênteses representa a mediana.

Além da comparação entre as atividades de  $^{40}\text{K}$  em solos do Nordeste e do Brasil, é necessária a comparação dos resultados do presente trabalho com as atividades em outros países. A Tabela 4.5 mostra a atividade do radionuclídeo em vários países. De todos os países listados na tabela somente Cuba (2.260 Bq/kg) e Espanha (2.040 Bq/kg) possuem atividade específica de  $^{40}\text{K}$  relatada maior que 2.000 Bq/kg. Países como China, República da Coreia, Suécia, Irlanda, Luxemburgo, Portugal, República Checa, Federação Russa, Eslováquia, Eslovênia e Grécia também apresentaram valores máximos de  $^{40}\text{K}$  elevados. Como é esperado, a maioria dos países apresentam atividade de acordo com a faixa mundial de 140 a 850 Bq/kg (UNSCEAR, 2000).

A comparação com os valores da literatura mostra que o  $^{40}\text{K}$  possui alta concentração no sertão de Alagoas. Da mesma forma, a literatura mostra outros locais no Nordeste com alta concentração de  $^{40}\text{K}$ , principalmente na Depressão Sertaneja localizadas na porção oeste do Planalto da Borborema.

Devido ao pouco volume de chuvas na região (importante fator de intemperismo) os solos da região são de uma forma geral jovens e rasos, ou seja, solos pouco desenvolvidos, com relação muito forte com a geologia do local. Logo os valores elevados de concentração de  $^{40}\text{K}$  devem estar fortemente correlacionados com a litologia e com o regime de precipitação, pois sendo o  $^{40}\text{K}$  um elemento com bastante mobilidade no solo, em locais de pouco volume de precipitação não ocorre lixiviação ou infiltração considerável, podendo ocorrer um acúmulo desse radionuclídeo no solo.

Tabela 4.5 Atividade específica de  $^{40}\text{K}$  (em Bq/kg) medida em diversos países  
(UNSCEAR, 2008, *apud* Ribeiro, 2016)

<b>País</b>	<b><math>^{40}\text{K}</math></b>	<b>País</b>	<b><math>^{40}\text{K}</math></b>
Argélia	66–1150	Islândia	40–240
Egito	29–650	Lituania	241–800
Estados Unidos	100–700	Suécia	600–1180
Costa Rica	6–380	Bélgica	100–1000
Cuba	20–2260	Alemanha	40–1340
Argentina	559–773	Irlanda	11–1317
China	9–1800	Luxemburgo	80–1800
Índia	38–760	Holanda	120–730
Japão	15–990	Portugal	220–1230
Indonésia	75–523	Espanha	31–2040
Malásia	170–430	Suíça	40–1000
República da Coréia	17–1500	Bulgária	40–800
Tailândia	7–712	República Checa	62–1599
Armênia	310–420	Hungria	79–570
Azerbaijão	60–180	Polônia	123–1020
Iran	290–710	Federação Russa	00–1400
Iraque	146–518	Eslováquia	200–1380
Kuwait	4–496	Eslovênia	15–1410
Síria	87–780	Croácia	107–748
Dinamarca	240–610	Chipre	0–670
Estonia	140–1120	Grécia	12–1570
Finlândia	300–1200	Montenegro	78–480
		Nova Zelândia	<40–740

#### 4.2.2 Comparação da concentração do $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$ com a literatura

Nessa seção são comparadas as atividades de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  em outras regiões do Brasil e principalmente na região Nordeste.

No Estado de Minas Gerais, a conhecida região do planalto de Poços de Caldas apresenta atividade para o  $^{226}\text{Ra}$  variando de 30 a 448 Bq/kg e para o  $^{228}\text{Ra}$  variando de 181 a 525 Bq/kg (AMARAL, E. C. S., 1992). Entretanto, estudos na região Nordeste mostram concentrações ainda maiores para esses radionuclídeos. No arquipélago de Fernando de Noronha a atividade medida do  $^{226}\text{Ra}$  variou entre 4,7 e 550 Bq/kg e para o  $^{228}\text{Ra}$  variou entre 10 e 298 Bq/kg (RIBEIRO *et al.*, 2017).

As maiores concentrações para esses radionuclídeos foram verificadas no Município de São José dos Espinharas na região central do Estado da Paraíba, mais especificamente na área de mineralização de U-ETR. A atividade do  $^{226}\text{Ra}$  ficou entre 18 e 2.593 Bq/kg medidos na estação seca e entre 11 e 2.865 Bq/kg na estação chuvosa. O  $^{228}\text{Ra}$  não foi medido, entretanto, foi medido o  $^{232}\text{Th}$  que apresentou atividade de 45 a 5.774 Bq/kg na estação seca e de 11 a 6.009 Bq/kg na estação chuvosa, todos medidos no horizonte A (PAIVA, 2008).

No presente estudo, a atividade específica encontrada para o  $^{226}\text{Ra}$  ficou entre 5 e 63 Bq/kg com média geométrica 24 Bq/kg e para o  $^{228}\text{Ra}$  a atividade ficou na faixa de 9,5 a 157 Bq/kg com média geométrica de 45 Bq/kg.

Os valores encontrados de atividade para o  $^{226}\text{Ra}$  são compatíveis com os valores encontrados em solos no mundo, que ficam no intervalo de 17 a 60 Bq/kg com média de 35 Bq/kg (UNSCEAR, 2000). Já para o  $^{228}\text{Ra}$  os valores de atividade encontrados para o Estado de Alagoas ficaram acima dos valores tipicamente encontrados no mundo 11 a 64 Bq/kg, com média de 30 Bq/kg (UNSCEAR, 2000).

Tabela 4.6 Comparação da atividade específica de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  em várias regiões do Brasil e no mundo com o Estado de Alagoas, adaptado (RIBEIRO, 2016)

Local	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/kg)	Referências bibliográficas
Estado de Alagoas	5 - 63 (28)	9,5 a 157 (54)	(Presente Trabalho)
Mundo	17- 60 (35)	11- 64 (30)	UNSCEAR, 2000
Agricultura orgânica, RJ	28 – 93	36 – 111	LAURIA, D. C., RIBEIRO, F. C. A., CONTI, C. C., 2009
Agricultura convencional, RJ	37 – 71	37 – 117	LAURIA, D. C., RIBEIRO, F. C. A., CONTI, C. C., 2009

Rio Grande do Norte	29	46,6	MALANCA, A., PESSINA, V., DALLARA, 1993
São Francisco de Itabapoana, RJ	23 – 154	71 – 699	LAURIA, 1999
Ilha Grande, RJ	2 – 235*	5 – 193**	ALENCAR, A. S. & FREITAS, 2005
Pedra, PE	14 – 367	-	SANTOS JÚNIOR, 2009
Estado de São Paulo	1,0 – 61,8	3,3 – 97,6	HIROMOTO, G., PERES, A. C., TADDEI, M. H., SOARES, M. R. & ALLEONI, 2007
Fernando de Noronha	4,7 – 550	10 – 298	RIBEIRO <i>et al.</i> , 2017
Região Fosfática de PE	14,2 – 240	-	AMARAL, R.; MAZZILLI, 1997
Solos agrícolas	42 – 142*	36 – 107**	UMISEDO, 2007
Caetité, BA	74 – 196	-	(CARDOSO <i>et al.</i> , 2009)
Poços de Caldas, MG	135	282	AMARAL, 1992
Poços de Caldas, MG	30 – 448	181 – 525	LINSALATA <i>et al.</i> , 1988
São José dos Espinharas, PB	18 a 2.593 (estação seca) <sup>a</sup> 11 – 2865 (estação chuvosa) <sup>a</sup>	45 a 5.774 (estação seca) <sup>a**</sup> 11 – 6009 (estação chuvosa) <sup>a**</sup>	PAIVA, 2008
Estado do Rio de Janeiro	3,5 a 100 (30)	5,4 a 314 (67)	RIBEIRO, 2016

\* concentração de  $^{238}\text{U}$

\*\* concentração de  $^{232}\text{Th}$

“a” valores medidos nas mostras do horizonte Ap

### 4.2.3 Comparação da concentração do $^{137}\text{Cs}$

Considerando os resultados encontrados de concentração de  $^{137}\text{Cs}$  para os solos de Alagoas, faz-se necessário comparar os resultados encontrados com dados da literatura. No Estado do Rio de Janeiro, 243 amostras foram coletadas, na profundidade de 0 a 20cm (RIBEIRO et al., 2016). Nesse estudo, trinta e seis amostras (14%) apresentaram atividade acima da AMD. Essa fração de amostras com atividade de  $^{137}\text{Cs}$  acima do AMD corresponde à quantidade encontrada no presente estudo (15%). Entretanto, o Estado do Rio de Janeiro possui latitude variando entre -21 a -23 aproximadamente. As amostras coletadas no Estado de Alagoas estavam localizadas em latitude entre -8 a -10 aproximadamente.

Na latitude onde se encontra o Estado de Alagoas, segundo SCHULLER *et al.* (2004), seriam esperadas densidades de deposição entre 115 e 385  $\text{Bq.m}^{-2}$ . Em contrapartida, de acordo com o mesmo autor, no intervalo de latitude que se encontra o Estado do Rio de Janeiro a densidade de deposição esperada varia entre 140 e 1620  $\text{Bq.m}^{-2}$ . Ou seja, considerando o limite superior, a densidade de deposição  $^{137}\text{Cs}$  poderia chegar a ser 4 vezes maior no Estado do Rio de Janeiro do que no Estado de Alagoas.

Apesar dos limites superiores do intervalo da densidade de deposição de  $^{137}\text{Cs}$  serem maiores quando se afasta da linha do Equador, Guimarães (1988) apresentou valor médio de deposição de  $^{137}\text{Cs}$  na bacia do rio Piracicaba, SP de 306  $\text{Bq.m}^{-2}$ . (BACCHI *et al.*, 2000) também relataram média de 419  $\text{Bq.m}^{-2}$  em outra bacia da mesma região (ANDRELLO, A. C.; APPOLONI, C. R.; GUIMARÃES, 2003) apresentaram valores médios de deposição de  $^{137}\text{Cs}$  de 292  $\text{Bq.m}^{-2}$  em Londrina, (ANDRELLO, A. C., APPOLONI, 2004), estudando a ocorrência de  $^{137}\text{Cs}$  em dois solos de floresta em Maringá mediram a densidade de deposição do elemento nos dois locais como valores de 241  $\text{Bq.m}^{-2}$  e 325  $\text{Bq.m}^{-2}$  para os dois ambientes.

No Estado do Paraná, foi analisando  $^{137}\text{Cs}$  em solos, encontrou-se concentrações variando entre 0,71 a 5,85  $\text{Bq/kg}$ , com deposição entre 39 a 1.618  $\text{Bq.m}^{-2}$  (SCHUCH, 1993). O autor cita ainda o aumento da deposição conforme o aumento da latitude: quanto mais ao sul, maior a deposição de  $^{137}\text{Cs}$  e destaca estudos anteriores que mostram que há também correlação positiva entre a precipitação pluviométrica e a deposição do elemento no solo.

No estado de Pernambuco, Antunes et al. (2010) estudaram a distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  em solos representativos desse Estado, encontrando nas camadas superficiais dos solos valores entre 0,5 a 2,06 Bq.kg<sup>-1</sup> (antes do acidente de Fukushima). Os autores citam que o solo com maior teor de matéria orgânica e com presença de argilominerais 2:1 apresentou a maior concentração de atividade, 2,06 Bq/kg. Os autores destacam ainda a correlação positiva entre os valores de concentração de  $^{137}\text{Cs}$  com os valores de pH e correlação negativa com as concentrações de  $\text{Al}^{3+}$ .

Em Fernando de Noronha, Pernambuco, foram encontradas concentrações de  $^{137}\text{Cs}$  variando entre 0,3 e 2,0 Bq/kg (média de 0,62 Bq/kg) (RIBEIRO *et al.*, 2017).

O valor baixo de atividade de  $^{137}\text{Cs}$  nos solos do Estado de Alagoas é compatível as predições de que baixos níveis de *fallout* são esperados em regiões equatoriais (UNSCEAR, 1969). Ou seja, os valores encontrados para a atividade específica do  $^{137}\text{Cs}$  no Estado de Alagoas estão dentro do intervalo de atividade encontrados na literatura para o hemisfério sul.

#### **4.3 Agrupamento dos valores de concentração dos radionuclídeos naturais**

Os valores das concentrações do  $^{40}\text{K}$  foram divididos em dois grandes grupos e subdividido em quatro subgrupos: 1.1, 1.2, 2.1 e 2.2. No grupo 1.1 a concentração variou de 5 a 269 Bq/kg; no grupo 1.2 de 371 a 546 Bq/kg; grupo 2.1 de 801 a 1.182 Bq/kg e no grupo 2.2 de 1.356 a 1.738 Bq/kg. O grupo 1 e 2 foi definido para um nível de similaridade utilizando a distância cinco. Os demais grupos mais específicos foram reunidos na distância três, conforme a Figura 4.6. O *software* SPSS utilizou a distância euclidiana quadrática para definir o distanciamento entre os dados e a ligação média entre os grupos.



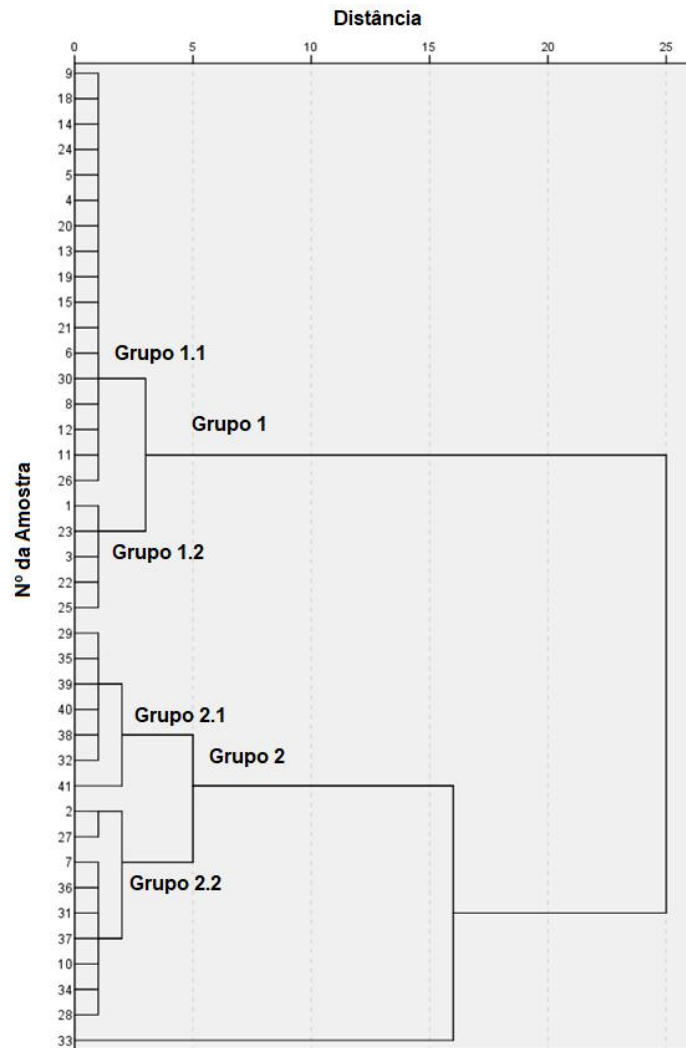


Figura 4.6 Dendrograma  $^{40}\text{K}$

A fim de buscar correlações com as características das amostras os grupos foram comparados com relevo, amplitude, declividade, tipo de solo no primeiro e segundo níveis, vegetação e uso do solo. O teste de Kruskal-Wallis e uma avaliação visual da matriz de dados (utilizando filtros) foram utilizados para essa comparação.

Para o  $^{40}\text{K}$ , o grupo 1 apresentou uma predominância para os Argissolos e Latossolos; regiões leste e agreste alagoano e para a classe de rocha sedimentar e metamórfica. Já o grupo 2 apresentou predominância com os Neossolos e Planossolos; com o sertão e com as rochas ígneas e metamórficas. Nenhuma correlação mais específica foi encontrada nos subgrupos.

O  $^{226}\text{Ra}$  também foi dividido em grupos (Figura 4.7), utilizando a mesma metodologia aplicada ao  $^{40}\text{K}$ . A concentração do grupo 2 ficou entre 5,05 a 19,62 Bq/kg,

do grupo 1.1 variou de 24,97 a 38,09 Bq/kg, do grupo 1.2 de 41,92 a 45,20 Bq/kg e para o grupo 3 entre 53,17 e 63,46 Bq/kg. Nenhuma correlação dos grupos com as características ambientais da região de coleta das amostras foi observada.

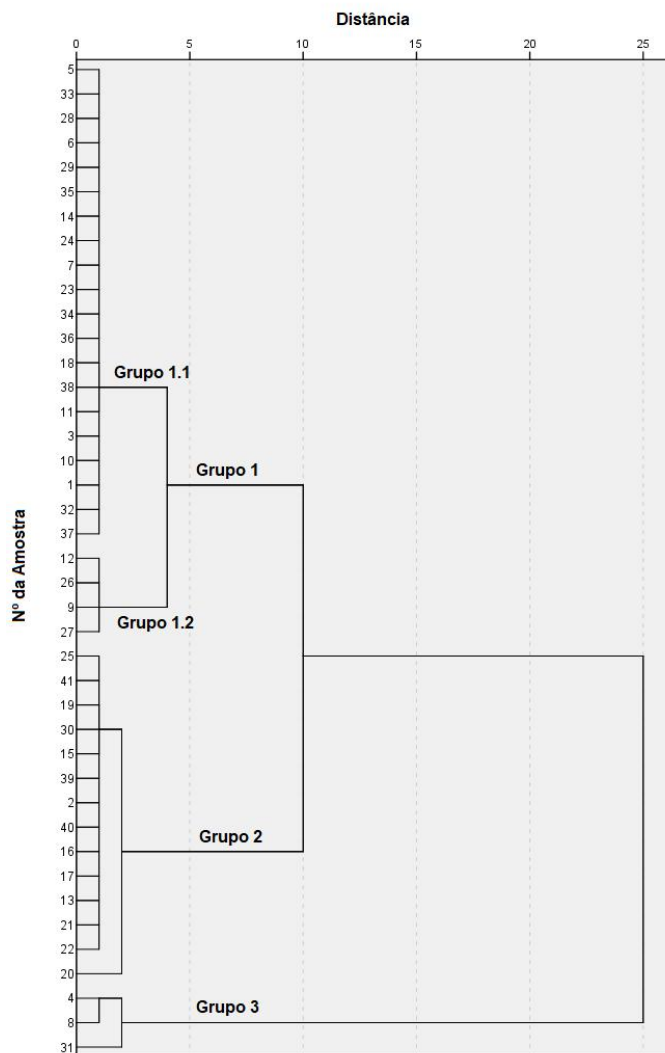


Figura 4.7 Dendrograma  $^{226}\text{Ra}$

O  $^{228}\text{Ra}$  foi dividido em três grupos, sendo as suas concentrações reunidas da seguinte forma: grupo 1 de 9,49 a 34,86 Bq/kg; grupo 2 de 39,05 a 83,63 Bq/kg e grupo 3 de 100,90 a 128,00 Bq/kg, conforme a Figura 4.8. Nenhuma correlação dos grupos com as características ambientais da região de coleta das amostras foi observada.

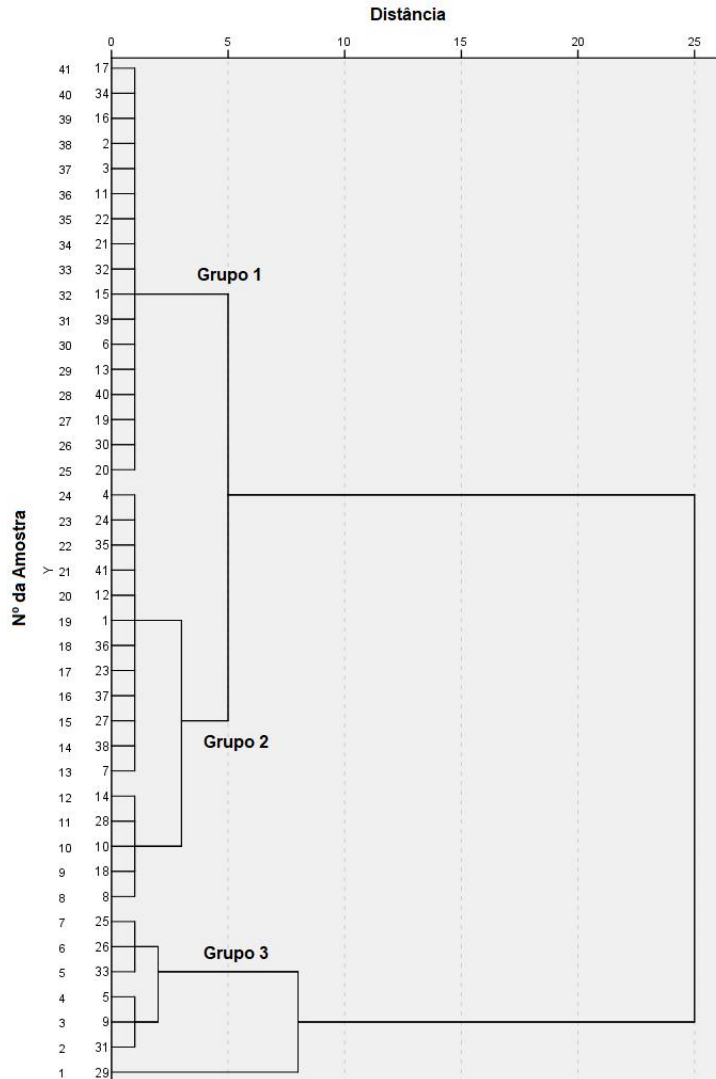


Figura 4.8 Dendrograma  $^{228}\text{Ra}$

Foi realizado ainda o agrupamento da relação entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  pela análise de cluster hierárquica no *software* SPSS (Figura 4.9). A divisão dos grupos ficou da seguinte forma:

- Grupo-I – Neste grupo estão as amostras com atividade mais baixas dos rádios, ou seja, atividade de  $^{226}\text{Ra}$  menor que 20 Bq/kg e atividade de  $^{228}\text{Ra}$  menor que 50 Bq/kg;
- Grupo-II – Neste grupo estão localizadas as amostras de atividade média com valores de atividade específica em torno de 50 Bq/kg de  $^{228}\text{Ra}$  e de aproximadamente 20 a 40 Bq/kg de  $^{226}\text{Ra}$ ;

- Grupo-II – Neste grupo estão as amostras com atividades mais altas mais de 100 Bq/Kg para o  $^{228}\text{Ra}$  e entre aproximadamente 20 a 40 Bq/Kg de  $^{226}\text{Ra}$ .

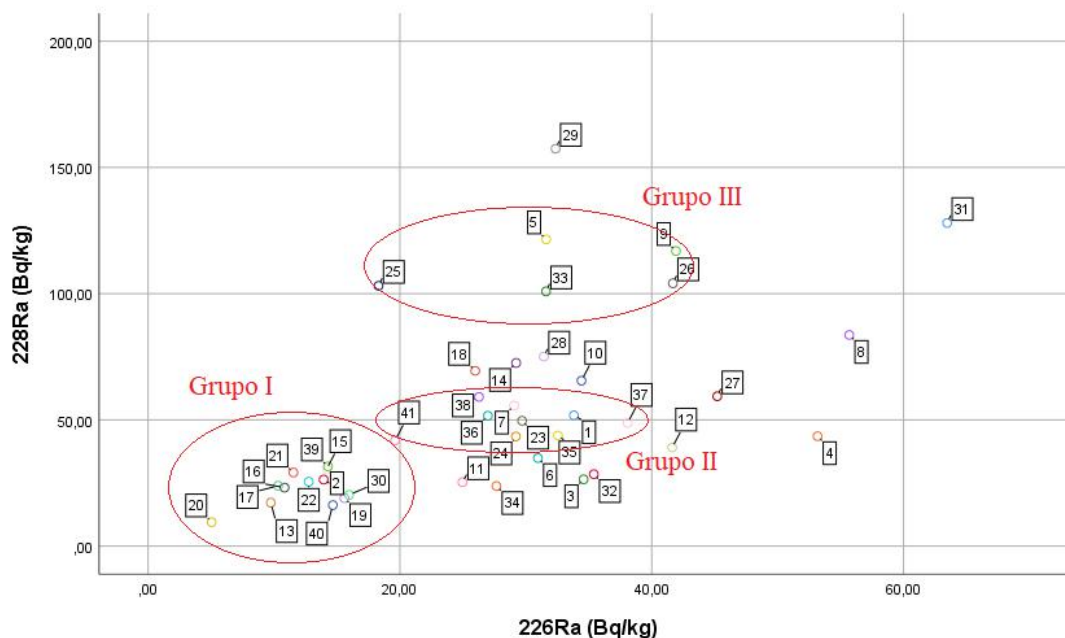


Figura 4.9 Agrupamento da relação entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$

Os grupos I, II e III foram comparados com várias informações da matriz de dados, entretanto nenhuma correlação importante foi observada para todos os radionuclídeos em relação às características citadas.

#### 4.4 Correlação entre as concentrações dos radionuclídeos naturais

O valor da concentração para todas as amostras de  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  foram correlacionadas conforme mostrado na Figura 4.9 ( $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ ). Já na figura 4.10 foram correlacionadas as concentrações de  $^{40}\text{K}$  com  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ . Foi observada uma correlação moderada entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  ( $R^2 = 0,32$ ) e positiva ( $y=1,51x$ ), conforme mostrado na Figura 4.10. No entanto, há uma correlação fraca ( $R^2 = 0,02$  e  $0,01$ ) entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$ , respectivamente, como mostrado Figura 4.11.

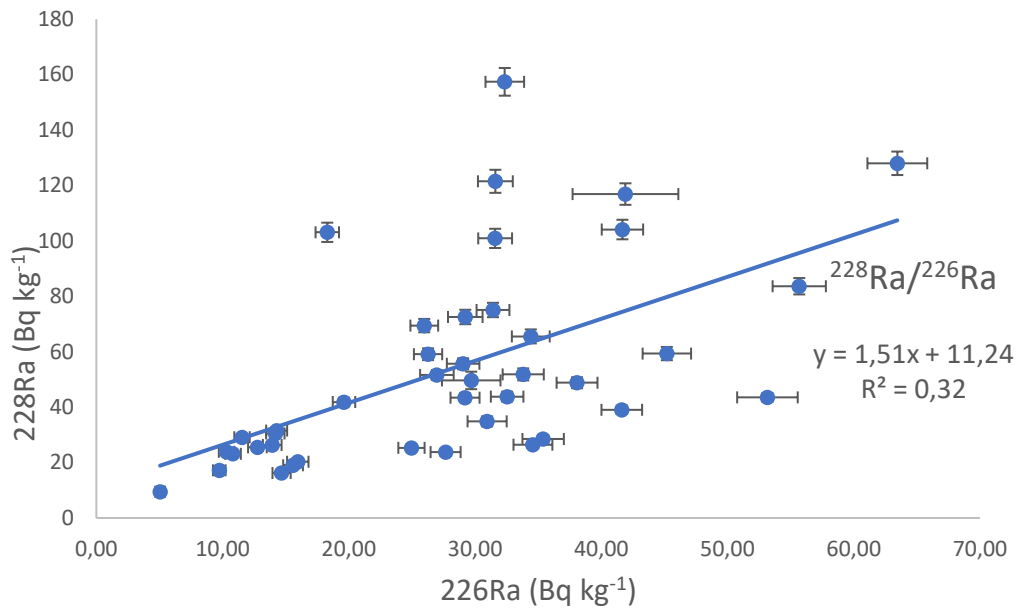


Figura 4.10 Correlação entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  para todas as amostras

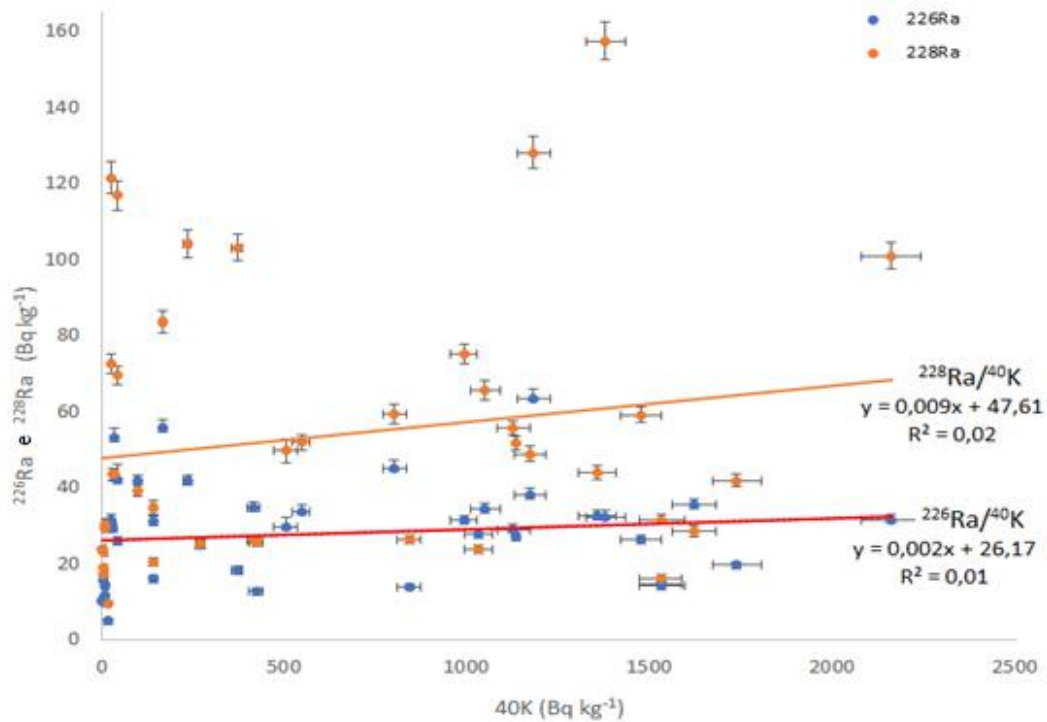


Figura 4.11 Correlação entre  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  para todas as amostras

Tendo em vista as diferentes características dos solos, clima, precipitação, formação geológica e relevo, a correlação entre as concentrações dos radionuclídeos foram realizadas separadamente para cada mesorregião. Logo, a concentração para amostras localizadas no leste, no agreste e no sertão também são correlacionada com os radionuclídeos estudados, conforme mostrado nas Figura 4.12 ( $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ ), 4.13 ( $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ ) e 4.14 ( $^{228}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ ).

Há uma correlação forte ( $R^2 = 0,58$ ) e positiva ( $y = 1,84x$ ) entre o  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  no sertão, conforme observado na Figura 4.12. Isso pode indicar uma resposta comum ao comportamento químico do solo e outros processos ambientais, da forma como os radionuclídeos são distribuídos no ambiente (ALAZEMI *et al.*, 2016; FUJIYOSHI, R., SAWAMURA, 2014; KHATER; HIGGYA; PIMPL, 2001). No entanto, existe uma correlação fraca ( $R^2 = 0,17$ ) entre o  $^{228}\text{Ra}$  e o  $^{226}\text{Ra}$  no agreste e uma correlação moderada ( $R^2 = 0,35$ ) e positiva ( $y = 1,29x$ ) no litoral.

A correlação entre isótopos de rádio ( $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) e  $^{40}\text{K}$  é fraca mesmo com a separação das regiões, com exceção do agreste que apresentou correlação moderada ( $R^2 = 0,39$ ) e positiva ( $y = 0,06x$ ) entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$ , conforme mostrado na Figura 4.14.

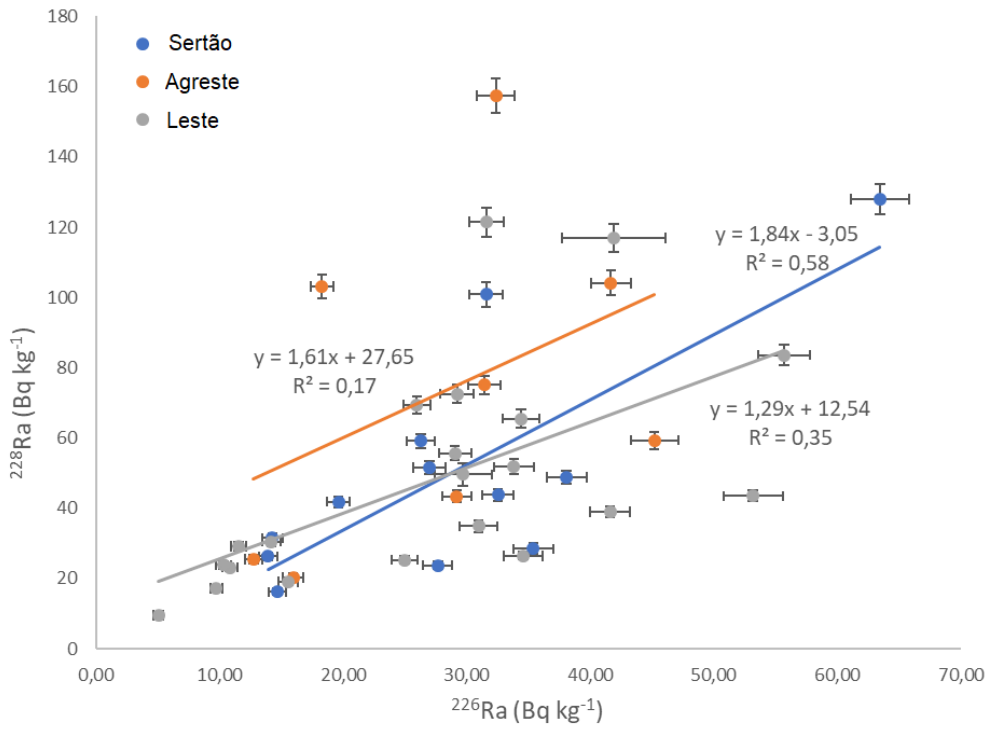


Figura 4.12 Correlação entre a concentração de  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  para as amostras localizadas no sertão, no agreste e no leste do Estado de Alagoas

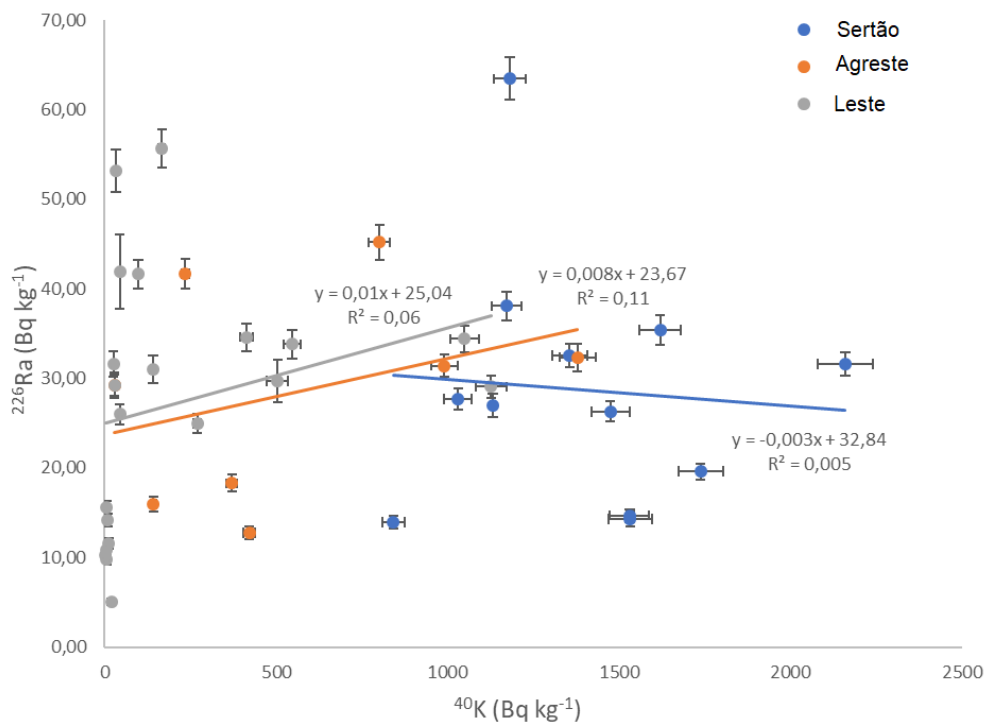


Figura 4.13 Correlação da concentração entre  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  para amostras do sertão, agreste e leste alagoano

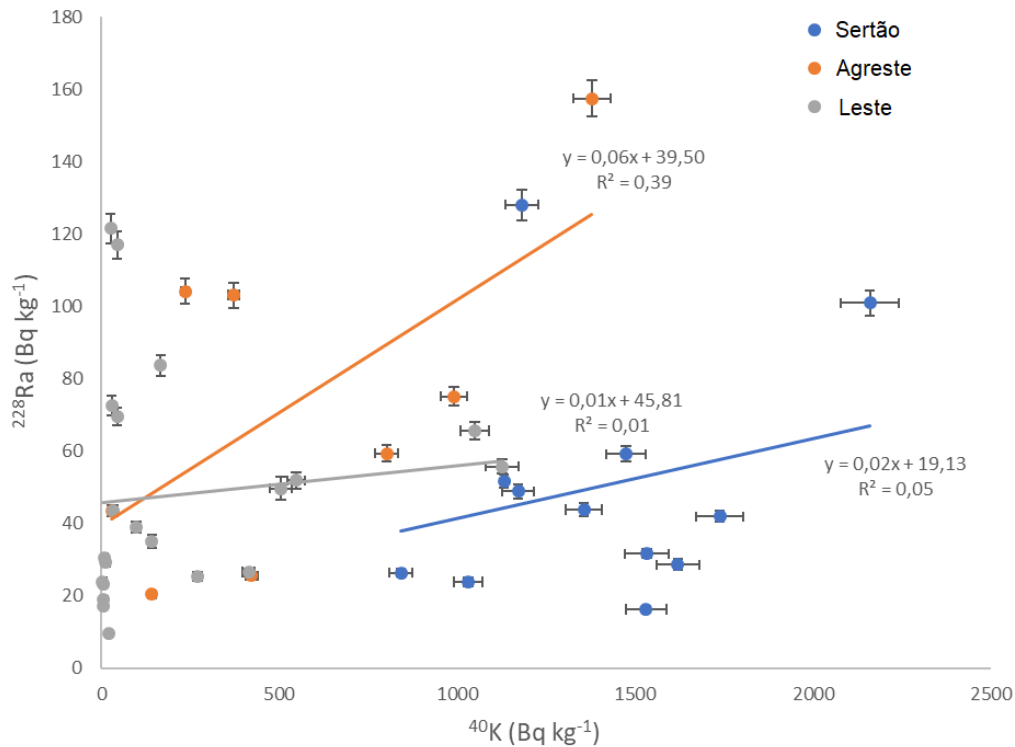


Figura 4.14 Correlação da concentração entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  para amostras do sertão, agreste e leste alagoano.

#### 4.4 Análise da concentração de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ e $^{228}\text{Ra}$ em relação aos tipos de solos

A análise da concentração dos radionuclídeos naturais nos diferentes tipos de solos presentes na maior parte do Estado de Alagoas, classificados no segundo nível categórico, será realizada de acordo com a ordem de prevalência desses solos. A exceção são os Latossolos, que devido ao pequeno número de amostras será analisado no primeiro nível categórico. A seguir serão analisados os seis tipos diferentes de solo presentes em mais de 76% da área do Estado de Alagoas.

##### 4.4.1 Análise estatística

Foi realizada análise estatística para cada tipo de solo. Dessa forma, foi conveniente construir *boxplots* a fim de visualizar mais facilmente a distribuição dos valores das concentrações, além de identificar *outliers*. As amostras têm o seguinte tamanho: Argissolos Amarelos ( $n= 8$ ), Argissolos Vermelhos-Amarelos ( $n= 5$ ),



Neossolos Litólicos (n= 6), Neossolos Regolíticos (n= 6), Planossolos Háplicos (n= 7), Latossolos (n= 4).

Como pode ser verificado na Figura 4.15 para o  $^{40}\text{K}$  a amostra 7 é um *outlier* para os Argissolos Vermelho-Amarelos e, por isso, será retirada do tratamento estatístico para a estatística descritiva. Pode-se perceber também que Neossolos e Planossolos registraram as maiores atividades de  $^{40}\text{K}$ , entretanto, Argissolos e Latossolos apresentaram concentrações mais baixas para esse radioisótopo.

Como também pode-se perceber na Figura 4.15, as medianas das distribuições de atividade do  $^{226}\text{Ra}$  são muito próximas para todos os tipos de solo. Além disso, as diferenças entre o 3º quartil (percentil 75) dessas amostras não são muito acentuadas. Ademais, as concentrações para a maioria dos solos estão distribuídas na faixa de 20 a 40 Bq/kg, ou seja, não há variação acentuada nos valores de concentração de um solo para outro, como ocorre para o  $^{40}\text{K}$ .

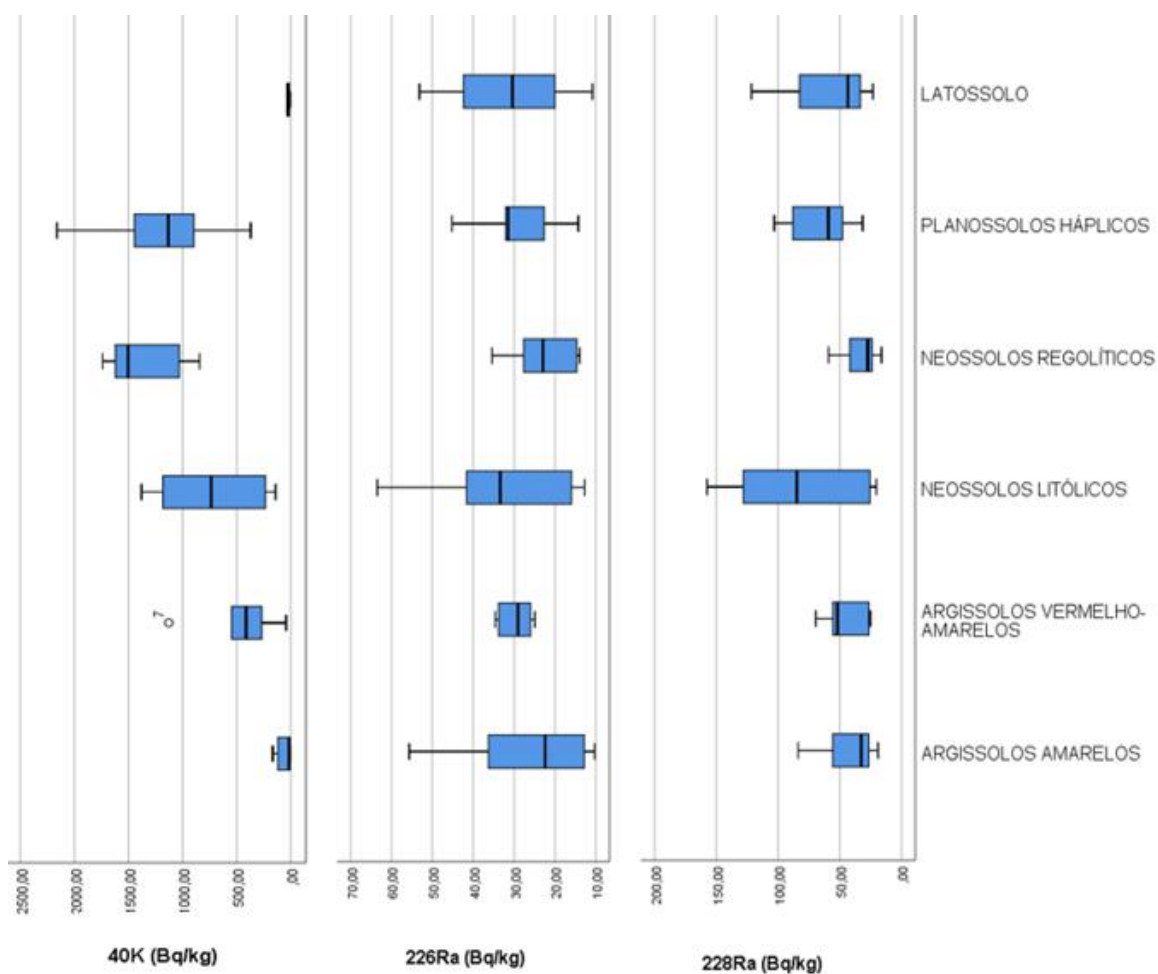


Figura 4.15 *Boxplot* dos valores de concentração de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  nos solos mais prevalentes no Estado de Alagoas

Como pode ser verificado na Figura 4.15 não existem *outliers* para a matriz de dados de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  para os diferentes tipos de solos estudados. Pode também ser observado que o  $^{228}\text{Ra}$  possui uma variação ligeiramente maior se comparada com o  $^{226}\text{Ra}$  para os diferentes tipos de solos, além disso, os valores mínimos são um pouco maiores e há mais variação, já que a maioria dos dados está na faixa de 25 a 100 Bq/kg.

O Argissolo Vermelho-Amarelo apresenta pequena variação interquartil na medida de concentração para os três radionuclídeos. Em contrapartida, o Neossolo Litólico apresenta a maior diferença interquartil para todos os radionuclídeos.

Dessa forma, é necessário comparar a distribuição de atividades de cada radioisótopo entre os diferentes tipos de solos a fim de verificar se existe diferença

estatística significativa entre as distribuições de concentrações comparadas com os tipos de solo um a um.

#### 4.4.2 Comparação da distribuição das concentrações nos diferentes tipos de solo

Foi aplicado o teste não paramétrico U de Mann-Whitney para realizar a inferência estatística sobre as diferenças nos valores de atividade para cada tipo de solo do Estado de Alagoas. Esse teste estatístico é uma ferramenta de decisão para aceitar ou rejeitar uma hipótese estatística. O teste U de Mann-Whitney é adequado quando as amostras são independentes, as variáveis são quantitativas, o tamanho amostral é pequeno e quando não se pode garantir que a distribuição dos dados é normal.

O nível de significância adotado foi 95%, dessa forma, o valor de  $p$  deve ser menor que 0,05 para que possamos rejeitar a hipótese nula de que as distribuições de atividade para dois tipos de solo são iguais e aceitar a hipótese alternativa de que as distribuições são diferentes. Encontram-se destacados na Tabela 4.7 as combinações de tipos de solo que possuem diferença significativa nas distribuições de atividade, sendo que quanto menor o valor de U mais distintas são as distribuições e o valor de  $p$  mostra o nível de significância.

Tabela 4.7 Resultados dos testes estatísticos do  $^{40}\text{K}$  para cada tipo de solo

		PA	PVA	RL	RR	SX	
<b>PVA</b>	U	3					<b>Legenda</b>
	$p$	0,013					
<b>RL</b>	U	1	11				<b>PA</b> - Argissolos Amarelos
	$p$	0,003	0,465				<b>PVA</b> - Argissolos Vermelho-Amarelos
<b>RR</b>	U	0	2	6			<b>RL</b> - Neossolos Litólicos
	$p$	0,001	0,018	0,055			<b>RR</b> - Neossolos Regolíticos
<b>SX</b>	U	0	5	13	15		<b>SX</b> - Planossolos Háplicos
	$p$	0,001	0,042	0,253	0,445		<b>L</b> – Latossolos
<b>L</b>	U	15	0	0	0	0	* Os valores destacados em cinza mostram diferenças estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) da distribuição de atividade entre os diferentes tipos de solo.
	$p$	0,86	0,014	0,011	0,011	0,008	

Como pode ser verificado na Tabela 4.7, houve diferença significativa nas distribuições de atividade do  $^{40}\text{K}$  entre a combinação de vários tipos de solo.

A atividade de  $^{40}\text{K}$  nos Argissolos Amarelos se diferenciou de todos os tipos de solo com exceção dos Latossolos. Logo, não houve diferença estatística significativa entre as atividades específicas dos Argissolos Amarelo e dos Latossolos (ou seja, o *p value* foi maior que 0,05). Da mesma forma, as atividades de  $^{40}\text{K}$  dos Latossolos são distintas para todos os tipos de solos, com exceção obviamente dos Argissolos Amarelos. Os Argissolos Vermelho-Amarelos também apresentaram diferença significativa de atividade de  $^{40}\text{K}$  em relação às amostras de Neossolos Regolíticos, Planossolos Háplicos e os Latossolos no presente estudo. Por outro lado, não foi mostrada diferença significativa entre as atividades medidas nos Neossolos Litólicos se comparadas com os Argissolos Vermelho-Amarelos, Neossolos Regolíticos e Planossolos Háplicos. Da mesma forma, não foi apresentada diferença estatística significativa da atividade específica de  $^{40}\text{K}$  entre os Neossolos Regolíticos e os Planossolos Háplicos. A observação desses resultados também pode ser visualizada na Figura 4.15.

Tabela 4.8 Resultados dos testes estatísticos do  $^{226}\text{Ra}$  para cada tipo de solo

	PA	PVA	RL	RR	SX		
<b>PVA</b>	U	16				<b>Legenda</b> PA - Argissolos Amarelos PVA - Argissolos Vermelho-Amarelos RL - Neossolos Litólicos RR - Neossolos Regolíticos SX - Planossolos Háplicos L - Latossolos * Os valores destacados em cinza mostram diferenças estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) da distribuição de atividade entre os diferentes tipos de solo.	
	<i>p</i>	0,558					
<b>RL</b>	U	15	13				
	<i>p</i>	0,245	0,715				
<b>RR</b>	U	23	9	12			
	<i>p</i>	0,897	0,273	0,337			
<b>SX</b>	U	20	16	17	14		
	<i>p</i>	0,355	0,808	0,568	0,317		
<b>L</b>	U	14	9	9	8		13
	<i>p</i>	0,734	0,806	0,522	0,394		0,850

A Tabela 4.8 mostra os resultados do teste estatístico não paramétrico U de Mann-Whitney para a distribuição de atividade do  $^{226}\text{Ra}$ . Como pode ser verificado nenhum

valor de “*p*” ficou abaixo do nível de significância estabelecido de 5%. Além disso, os valores de U são todos elevados reforçando que não há diferença estatística entre os valores de atividades medidos nos diversos tipos de solos estudados no Estado de Alagoas para o <sup>226</sup>Ra.

Tabela 4.9 Resultados dos testes estatísticos do <sup>228</sup>Ra para cada tipo de solo

	PA	PVA	RL	RR	SX	<b>Legenda</b>
<b>PVA</b>	U	18				
	<i>p</i>	0,770				PVA - Argissolos Vermelho-Amarelos
<b>RL</b>	U	15	10			RL - Neossolos Litólicos
	<i>p</i>	0,245	0,361			RR - Neossolos Regolíticos
<b>RR</b>	U	17	9	9		SX - Planossolos Háplicos
	<i>p</i>	0,366	0,273	0,150		L – Latossolos
<b>SX</b>	U	11	10	17	4	* Os valores destacados em cinza mostram
	<i>p</i>	0,049	0,223	0,568	0,015	diferenças estatisticamente significativa
<b>L</b>	U	11	9	9	7	( <i>p</i> <0,05) da distribuição de atividade entre os
	<i>p</i>	0,396	0,806	0,522	0,286	diferentes tipos de solo.

A Tabela 4.9 mostra o resultado dos testes de hipótese para o <sup>228</sup>Ra. Como pode ser observado os Planossolos Háplicos (SX) se diferenciam de forma significativa dos Argissolos Amarelos (PA) e dos Neossolos Regolíticos (RR). Embora somente o Planossolo Háplico (SX), Argissolo Amarelo (PA) e o Neossolo Regolítico (RR) tivessem apresentado diferença significativa entre as distribuições de atividade, as diferenças entre os terceiros quartis para os demais solos (Argissolos Vermelho-Amarelos-PVA, Latossolo-L e Neossolo Litólico-RL) são grandes. Essas diferenças se mostram mais evidentes principalmente para o Neossolo Litólico que possui grande variância. Se, por exemplo, compararmos o percentil (75) do Neossolo Litólico (RL) e o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) observa-se que a diferença entre eles é pouco mais que o dobro.

### 4.4.3. Valores de base em relação aos tipos de solos

Os valores de base aqui apresentados representam a medida da concentração dos radionuclídeos estudados em diferentes tipos de solo na época em que foram coletadas as amostras de solo, ou seja, 2011. Esses valores ajudam a esclarecer, por exemplo, se houve contaminação (após a data da coleta) por meio da comparação entre valores aqui apresentados e os valores medidos de concentração.

#### 4.4.3.1 Valores de base para o $^{40}\text{K}$

Como fora observado na Figura 4.23 e nas estatísticas descritivas dos solos, o  $^{40}\text{K}$  variou de forma muito significativa em relação diferentes tipos de solo no Estado de Alagoas. Dessa forma, uma estimativa única do valor de base do  $^{40}\text{K}$  para todo o Estado seria inadequada, levando a interpretações equivocadas. Nesse caso o maior risco seria a interpretação de que o solo não estaria contaminado, quando na verdade poderia estar. Isso poderia ocorrer já que os valores altos de atividade de  $^{40}\text{K}$  elevam os valores dos percentis o que tornaria a avaliação da atividade de  $^{40}\text{K}$  mais suscetível a falsos negativo. Dessa forma, o estabelecimento de valores de base para o  $^{40}\text{K}$  em cada tipo de solo é mais adequada para o Estado de Alagoas.

A estatística descritiva foi realizada então para cada um dos tipos de solo, sendo o *outlier* identificado no Argissolo Vermelho-Amarelo para o  $^{40}\text{K}$  retirado para a realização da estatística descritiva, conforme mostrada na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Estimativa dos valores de base para o  $^{40}\text{K}$  para os solos de interesse

	<b>PA</b>	<b>PVA</b>	<b>RL</b>	<b>RR</b>	<b>SX</b>	<b>L</b>
<b>Média (Bq/kg)</b>	57	318	735	1.372	1.192	23
<b>Mediana</b>	19	341	736	1.503	1.132	27
<b>Variância</b>	4542	46317	4282563	125641	324992	169
<b>Desvio Padrão</b>	67	215	531	354	570,08	13
<b>Contagem</b>	8	4	6	6	7	4
<b>Mínimo (Bq/kg)</b>	<AMD	44	142	842	371	<AMD
<b>Máximo (Bq/kg)</b>	166	546	1.379	1.738	2.160	33

<b>Percentil (75)</b>	130	513	1.231	1.649	1.533	32
<b>Percentil (90)</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Assimetria</b>	0,86	-0,54	-0,04	-0,81	0,41	-1,63
<b>Curtose</b>	-1,22	-0,30	-2,59	-1,14	0,65	2,81

Legenda: PA - Argissolos Amarelos, PVA - Argissolos Vermelho-Amarelos, RL - Neossolos Litólicos, RR - Neossolos Regolíticos, SX - Planossolos Hápticos e L – Latossolos; AMD=8Bq/kg

O SPSS não pôde calcular o percentil 90 devido ao pequeno tamanho amostral para cada tipo de solo.

#### 4.4.3.2 Valores de base para o $^{226}\text{Ra}$

Os valores de base para a atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$  podem ser estabelecidos com um único valor para todo o Estado de Alagoas. Isso ocorre, pois não há diferenças estatísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre os tipos de solos estudados para esse radionuclídeo, como foi observado na Tabela 4.11. Além disso, não há muita dispersão estatística da atividade específica entre os diferentes tipos de solos, conforme pode ser verificado na Figura 4.24.

A fim de estimar os valores de base foi primeiramente verificada a existência de *outliers* pelo método do *boxplot* em relação a todos os valores de atividade de  $^{226}\text{Ra}$ . A amostra n° 31 foi identificada com *outlier*. Foi realizada então a estatística descritiva retirando-se o *outlier* de acordo com a Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Estimativa dos valores de base do  $^{226}\text{Ra}$  para o Estado de Alagoas

<b>Todos os Solos do Estado de Alagoas</b>	
<b>Média (Bq/kg)</b>	27
<b>Mediana</b>	29
<b>Variância</b>	147,73
<b>Desvio Padrão</b>	12
<b>Contagem</b>	40
<b>Mínimo (Bq/kg)</b>	5
<b>Máximo (Bq/kg)</b>	55

<b>Percentil (75)</b>	34
<b>Percentil (90)</b>	41
<b>Assimetria</b>	0,25
<b>Curtose</b>	-0,35

#### 4.4.3.3 Valores de base para o $^{228}\text{Ra}$

Os valores de base do  $^{228}\text{Ra}$  podem ser estimados para cada tipo de solo, uma vez que houve diferença estatística entre três tipos de solos, conforme pode ser verificado na Tabela 4.12. Os demais tipos de solos, embora sem diferença estatística, apresentam grande variância e diferenças significativa entre os terceiros quartis (conforme pode ser verificado na Figura 4.15), o que poderia levar a interpretações inadequadas. Segue na Tabela 4.15 com os resultados da estatística descritiva.

Tabela 4.12 Estimativa valores de base do  $^{228}\text{Ra}$  para os solos de interesse

	<b>PA</b>	<b>PVA</b>	<b>RL</b>	<b>RR</b>	<b>SX</b>	<b>L</b>
<b>Média</b>	41	43	83	32	66	57
<b>Mediana</b>	32	39	84	27	59	43
<b>Variância</b>	553	454	3109	237	767	1889
<b>Desvio Padrão</b>	23	21	55	15	27	43
<b>Contagem</b>	8	5	6	6	7	4
<b>Mínimo</b>	19	25	20	16	31	23
<b>Máximo</b>	83	69	157	59	103	121
<b>Percentil (75)</b>	64	65	135	46	100	102
<b>Percentil (90)</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Assimetria</b>	1,21	0,55	0,08	1,13	0,35	1,69
<b>Curtose</b>	0,06	-2,86	-1,81	0,90	-1,43	3,21

Legenda: PA - Argissolos Amarelos, PVA - Argissolos Vermelho-Amarelos, RL - Neossolos Litólicos, RR - Neossolos Regolíticos, SX - Planossolos Háplicos e L - Latossolos



Não foi possível calcular o percentil 90 pelo método utilizado pelo *software* SPSS devido ao pequeno tamanho amostral para cada tipo de solo.

#### 4.9.1.4 Valor de base para o $^{137}\text{Cs}$

Como se pode observar na Tabela 4.2 poucas amostras tiveram resultados com atividade superior a mínima detectável pelo método utilizado. Essa característica, ou seja, o valor baixo de atividade de  $^{137}\text{Cs}$  nos solos do Estado de Alagoas é compatível as predições de que baixos níveis de *fallout* são esperados em regiões equatoriais (UNSCEAR, 1969).

A AMD variou entre 0,22 e 3,39 Bq/kg, uma vez que seu valor depende da massa da amostra e do detector utilizado. Entretanto, o valor 3,39 é um *outlier* pelo método de Rosner realizado por meio do ProUCL 5.1.

Considerando que grande parte dos dados estão abaixo da AMD, utilizou-se o seguinte método: dividiu-se a AMD pela metade dos valores das medidas abaixo da AMD, os resultados da estatística descritiva realizada por esse método são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Estimativa dos valores de base de  $^{137}\text{Cs}$  no Estado de Alagoas

$^{137}\text{Cs}$	
Média (Bq/kg)	0,49
Erro padrão	0,03
Mediana (Bq/kg)	0,46
Média geométrica (Bq/kg)	0,45
Percentil 75 (Bq/kg)	0,60
Percentil 90 (Bq/kg)	0,83
Desvio padrão	0,21
Variância da amostra	0,04
Curtose	0,85
Assimetria	0,77
Mínimo (Bq/kg)	0,11
Máximo (Bq/kg)	1,13

Contagem	40
Nível de confiança (95,0%)	0,06

A Tabela 4.14 mostra de forma resumida o estabelecimento dos valores de base para os radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{Cs}$  para o Estado de Alagoas relacionada a alguns tipos de solo.

Tabela 4.14 Estimativa dos valores de base para o Estado de Alagoas em Bq/kg para alguns tipos de solo

Radionuclídeo	Tipo de Solo	Sigla	P(75)	P(90)
$^{40}\text{K}$	Argissolos Amarelos	PA	130	-
	Argissolos Vermelho-Amarelos	PVA	513	-
	Neossolos Litólicos	RL	1.231	-
	Neossolos Regolíticos	RR	1.649	-
	Planossolos Háplicos	SX	1.533	-
	Latossolos	L	32	-
$^{226}\text{Ra}$	Todos os Solos	-	34	41
$^{228}\text{Ra}$	Argissolos Amarelos	PA	64	-
	Argissolos Vermelho-Amarelos	PVA	65	-
	Neossolos Litólicos	RL	135	-
	Neossolos Regolíticos	RR	46	-
	Planossolos Háplicos	SX	100	-
	Latossolos	L	102	-
$^{137}\text{Cs}$	Todos os Solos	-	0,60	0,83

#### 4.5 Comparação da concentração entre as mesorregiões

A mesorregião é uma antiga classificação do IBGE que relaciona as características físicas, econômicas e sociais de determinadas regiões. Em Alagoas é estabelecida como leste, agreste e sertão. O conhecimento da distribuição dos radionuclídeos naturais entre as mesorregiões do Estado de Alagoas tem objetivo de facilitar a identificação dos níveis de atividade do solo de forma mais simplificada, quando se desconhece, por exemplo, o tipo de solo. Considerando as características particulares de Alagoas com relação ao solo, clima e relevo entre as mesorregiões a caracterização das atividades específicas nos solos dessas regiões se torna conveniente.

A distribuição de atividade de  $^{40}\text{K}$  variou de forma significativa entre as mesorregiões, conforme mostrado na Figura 4.16. O sertão é característico por apresentar alta concentração de  $^{40}\text{K}$  enquanto o leste alagoano apresentou as menores concentrações. Já a região do agreste é caracterizada por uma região de transição com valores de concentração de  $^{40}\text{K}$  entre os encontrados no sertão e leste alagoano.

Essas diferenças da concentração de  $^{40}\text{K}$  entre as mesorregiões estão intimamente ligadas com a geologia, pedologia, clima e relevo que são bem característicos para as regiões.

Em áreas menos úmidas os produtos minerais das reações de hidrólise são diferentes. Por falta de água, mesmo em relevos favoráveis, os elementos mais móveis não são lixiviados e, assim, os minerais neoformados são argilominerais com mais silício que a caolinita, e com uma estrutura que permite a retenção dos elementos alcalinos e alcalinoterrosos (sódio e potássio, e cálcio e magnésio, respectivamente) (TOLEDO, 2014)

Não houve variações importantes da concentração de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  em relação às mesorregiões, conforme observado nas Figura 4.17 e 4.18.

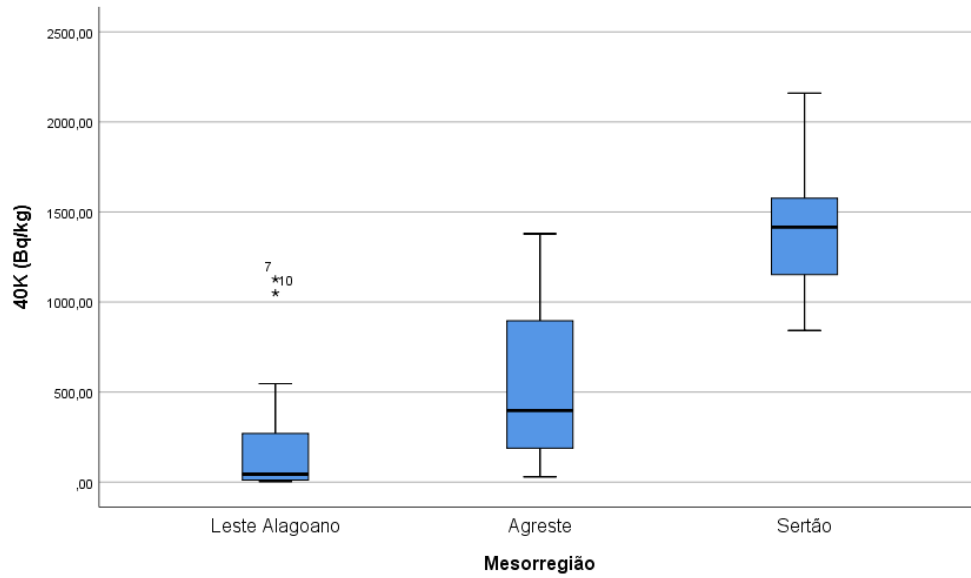


Figura 4.16 Distribuição da concentração de  $^{40}\text{K}$  entre as mesorregiões do Estado de Alagoas

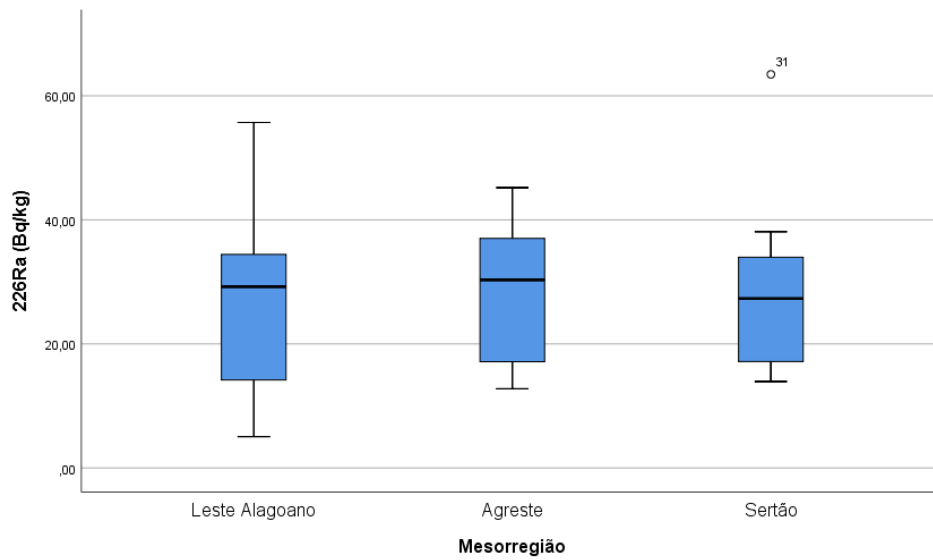


Figura 4.17 - Distribuição da concentração de  $^{226}\text{Ra}$  entre as mesorregiões do Estado de Alagoas

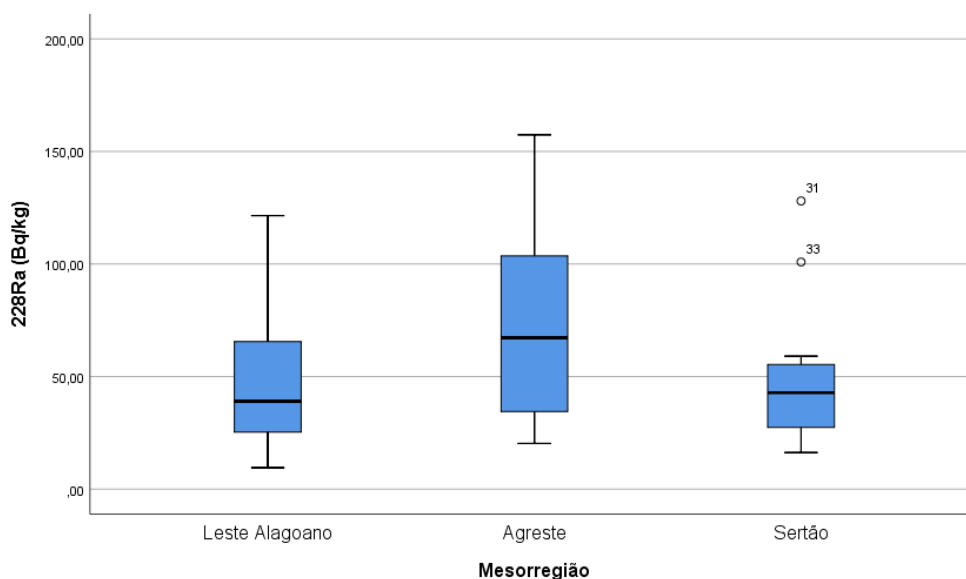


Figura 4.18 Distribuição da concentração de  $^{228}\text{Ra}$  entre as mesorregiões do Estado de Alagoas

#### 4.6 Análise da deposição de $^{137}\text{Cs}$

O acidente nuclear de Fukushima ocorreu no dia 11 de março de 2011 no Japão. As amostras utilizadas no presente trabalho foram coletadas entre 11 de janeiro de 2011 e 31 de outubro de 2011, isto é, o acidente de Fukushima ocorreu durante o período de coleta das amostras.

Das 41 amostras, apenas quatro amostras foram coletadas antes do acidente, no dia 11 de janeiro 2011. Dessas quatro amostras, duas (amostras nº 13 e 24) apresentaram atividade acima da AMD com 0,30 Bq/kg e 0,46 Bq/kg respectivamente. Duas amostras foram coletadas no dia do acidente e não é esperada qualquer contaminação em Alagoas no mesmo dia de um acidente nuclear que ocorreu no Japão. Essas duas amostras apresentaram atividade abaixo da AMD.

As amostras coletadas depois do acidente que apresentaram atividades específicas acima do AMD foram as seguintes: a amostra nº11, coletada em 11/04/2011 (um mês após o acidente), apresentou atividade de 0,47 Bq/kg; a amostra nº 3, coletada em 11/06/2011 (três meses após o acidente), apresentou atividade de 0,46 Bq/kg. Entretanto, a maioria das amostras (total de 24 amostras) foi coletada no mês de novembro de 2011.

As amostras nº 22 e nº 14, coletadas nos dias 29 e 31 novembro de 2011 (pouco mais de oito meses após o acidente), apresentaram atividades de 0,66 e 1,13 Bq/kg respectivamente.

Assim, quatro amostras foram coletadas antes do acidente e duas amostras foram coletadas no dia do acidente. Dessas seis amostras duas apresentaram atividade acima da AMD, ou seja, 1/3 das mostras. Das 35 amostras restantes, coletadas após o acidente, quatro apresentaram atividade acima da AMD, ou seja, 11,42%.

Nota-se que, embora a proporção de amostras com atividade acima do AMD seja menor após o acidente de Fukushima, o valor de atividade específica se mostrou um pouco mais elevado, conforme pode ser verificado na Tabela 4.15. Apesar disso, não é possível afirmar que o  $^{137}\text{Cs}$  encontrado é oriundo do acidente de Fukushima.

Tabela 4.15 Matriz de dados das amostras com concentração de <sup>137</sup>Cs acima da AMD

Nº amostra	Mesorregião	Relevo	Amplitude (m)	Declividade (Graus)	Tipo de Solo (2º nível categórico)	Tipo de Vegetação	Pluviosidade na data da coleta	Fukushima	Data da Coleta	<sup>137</sup> Cs (Bq/Kg)	Incerteza <sup>137</sup> Cs (Bq/Kg)	AMD (Bq/Kg)
3	Leste	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	30 a 80	5 a 20	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS	Terras Cultivadas ou Pastagens	Chuvas Esparsas	Depois	11/06/2011	0,46	0,08	0,32
11	Leste	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	30 a 80	5 a 20	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS	Terras Cultivadas ou Pastagens	Chuvas Fortes Recentes	Depois	11/04/2011	0,47	0,10	0,41
13	Leste	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	20 a 50	0 a 3	Solos Indiscriminados de Mangues	Floresta Fechada	Período Seco	Antes	11/01/2011	0,30	0,08	0,24
14	Leste	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	20 a 50	0 a 3	ARGISSOLOS AMARELOS	Terras Cultivadas ou Pastagens	Período Seco	Depois	31/10/2011	1,13	0,46	0,71
22	Agreste	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	30 a 80	5 a 20	NEOSSOLOS LITÓICOS	Terras Cultivadas ou Pastagens	Período seco	Depois	29/10/2011	0,66	0,20	0,59
24	Agreste	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	20 a 50	0 a 3	LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS	Terras Cultivadas ou Pastagens	Período Seco	Antes	11/01/2011	0,46	0,10	0,43

Nota-se que nenhuma amostra coletada no sertão apresentou concentração de céσιο acima da AMD. A maioria das amostras onde o  $^{137}\text{Cs}$  foi detectado fica no leste alagoano (Figura 4.19), região com índice pluviométrico maior. O relevo para todas as amostras foi o “domínio de colinas dissecadas e morros baixos”, sendo a amplitude variando de 20 a 80 metros e a declividade de até 20 graus. A maioria das amostras em que a concentração de atividade de  $^{137}\text{Cs}$  foi determinada acima da AMD é de Argissolos, sendo encontrado também o  $^{137}\text{Cs}$  em solos de mangue, que possuem alto conteúdo de matéria orgânica.

Pode-se verificar da análise da Figura 4.21 que quatro das seis amostras que apresentaram atividade acima da AMD estão em uma mesma linha da malha, paralela à costa, a uma distância de aproximadamente 50 Km.

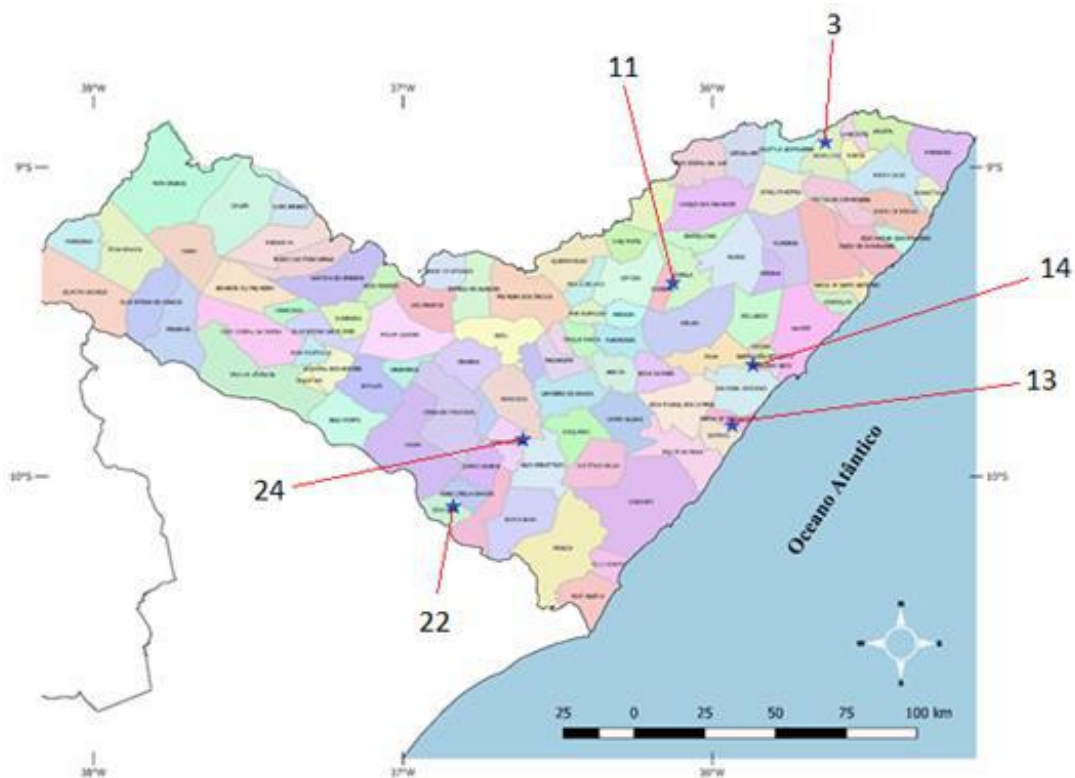


Figura 4.19 Localização das amostras de  $^{137}\text{Cs}$  com concentração acima da AMD

Uma possível explicação para esse comportamento de deposição seja a ocorrência de chuvas orográficas na região devido à elevação no relevo, principalmente devido ao Planalto da Borborema.



Nas chuvas orográficas, as massas de ar úmidas encontram a elevação do relevo (tal como o Planalto da Borborema) e são empurradas para camadas mais altas da atmosfera. O ar mais quente, leve e úmido vindo do oceano encontram essas camadas mais altas e frias, gerando a condensação do vapor e provocando chuvas próximas a essas elevações, conforme mostrado na Figura 4.20.

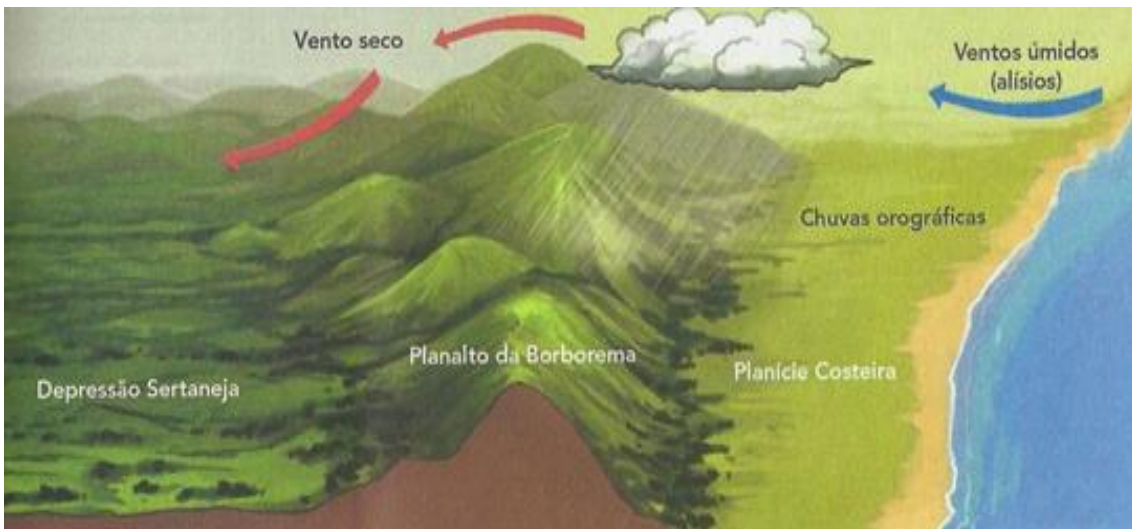


Figura 4.20 Esquema das chuvas orográficas no Nordeste (RAQSONU, 2011)

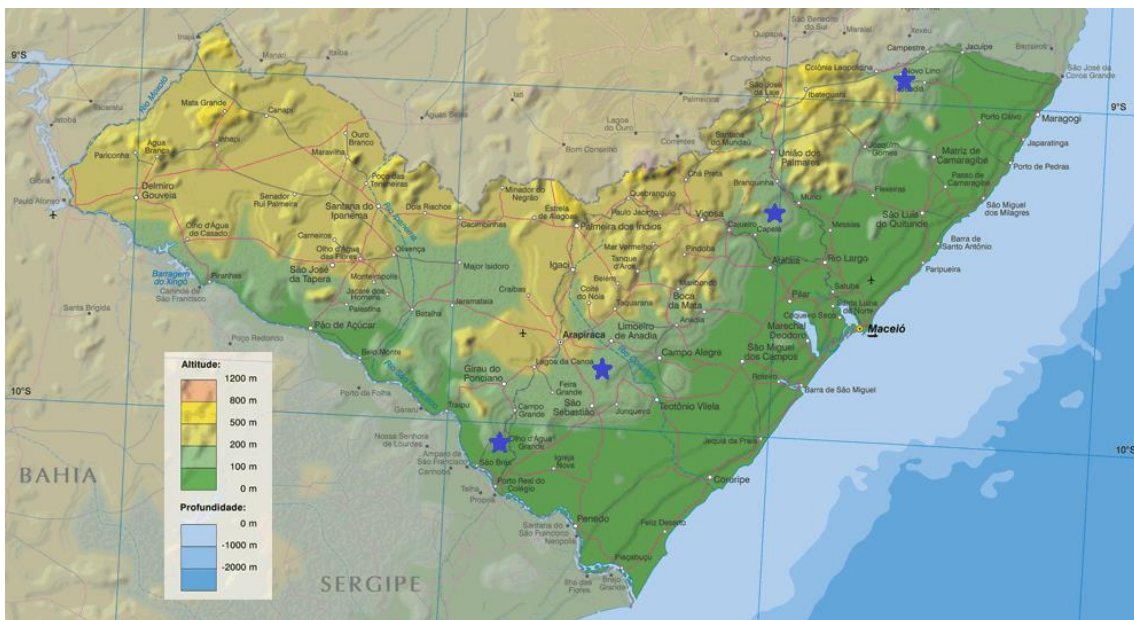


Figura 4.21 Local com  $^{137}\text{Cs}$  detectado próximas as elevações do Estado de Alagoas, adaptado (ALAGOAS, 2014)

Fenômeno semelhante foi observado no Japão após o acidente de Fukushima. Níveis de atividade relativamente maiores em solos nas cordilheiras de Hida, Chugoku e Shikoku (YASUNARI *et al.*, 2011) foram encontrados. Houve uma concentração de atividade não esperada nesses locais que, segundo os autores, provavelmente foi ocasionado pelas chuvas orográficas (Figura 4.22).

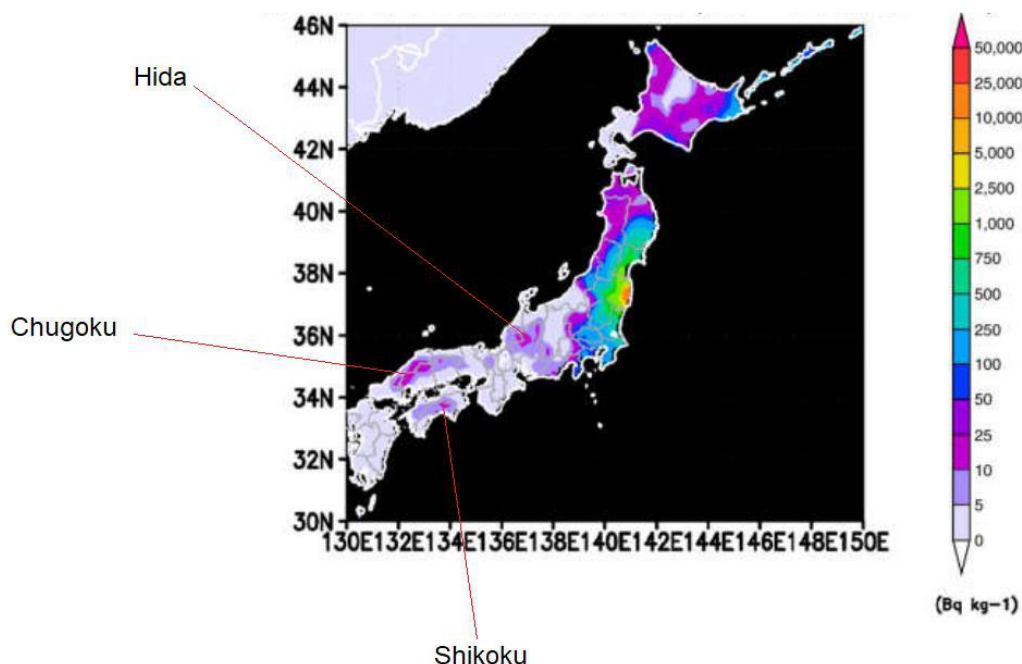


Figura 4.22 Concentração de  $^{137}\text{Cs}$  em solos no Japão após o acidente nuclear de Fukushima

Assim, é bastante provável que o Planalto da Borborema influencie na dinâmica da deposição de  $^{137}\text{Cs}$  nos solos de Alagoas.

#### 4.7 Mapas radiológicos do Estado de Alagoas

A fim de apresentar a distribuição espacial das diferentes concentrações dos radionuclídeos naturais  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  no Estado de Alagoas, mapas radiológicos foram elaborados. Os mapas da distribuição de radionuclídeos ajudam na interpretação dos dados e na comparação com diferentes tipos de solos, geodiversidade, mesorregiões,

relevos, cidades, dados epidemiológicos, entre outros. Os mapas foram criados a partir do *software* Qgis por meio de técnicas de interpolação.

#### **4.7.1 Potássio 40**

A Figura 4.23 mostra a distribuição da concentração de  $^{40}\text{K}$  no Estado de Alagoas. Nota-se que as maiores atividades são encontradas no sertão e estão relacionadas com o tipo de solo mais prevalente nessa região, NEOSSOLOS e PLANOSSOLOS, que por sua vez estão relacionados a fatores meteorológicos como clima e índice pluviométrico, além do relevo e do material de origem. Ou seja, os fatores da pedogênese influenciam diretamente na concentração dos radionuclídeos nos solos. Nesse caso particular, devido ao baixo índice pluviométrico, na região do sertão são encontrados solos jovens, isto é, solos pouco desenvolvidos, tendo sua composição fortemente relacionada ao material de origem, nesse caso a rocha matriz. Dessa forma, a alta concentração do  $^{40}\text{K}$  está ligada a fatores da formação geológica da região. Na Figura 4.23 nota-se claramente a diminuição da atividade de  $^{40}\text{K}$  do sertão para o agreste, acompanhando divisão entre as mesorregiões (sertão, agreste e leste alagoano), que por sua vez está também relacionada a fatores climáticos.

O leste alagoano é a região que possui menor concentração de  $^{40}\text{K}$  em todo o Estado. Entretanto, é a região produtora da cana-de-açúcar, cuja produção é intensiva, característica do agronegócio. Logo, são plantações com utilização esperada de fertilizantes químicos a fim de aumentar a produtividade da lavoura.

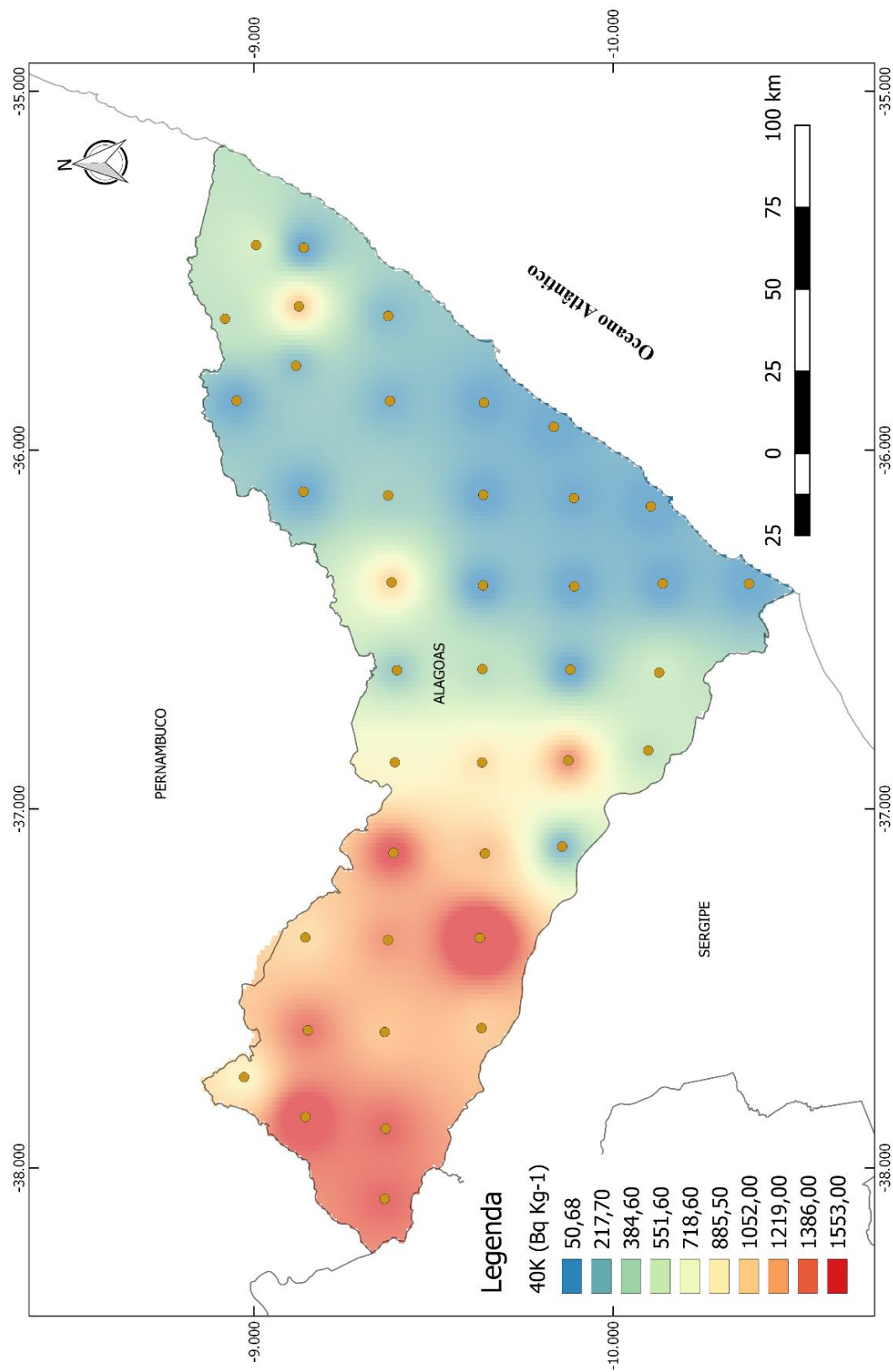


Figura 4.23 Distribuição da concentração de  $^{40}\text{K}$  no Estado de Alagoas

Como pode ser visto na Figura 2.22 a região do leste alagoano é onde estão localizadas as maiores propriedades rurais do Estado. Entretanto, a análise do mapa acima não mostra uma concentração aumentada de  $^{40}\text{K}$  nessa região. Por outro lado, na região do sertão, que é caracterizada por pequenas propriedades e agricultura de subsistência, não é esperado uso extensivo de fertilizante é a região onde são encontradas atividades altas de  $^{40}\text{K}$  nos solos. Esse resultado indica que as altas concentrações de  $^{40}\text{K}$  no sertão de Alagoas provavelmente estão mais relacionadas a questões naturais, geológicas e pedológicas, do que relacionadas à fertilização química.

#### 4.7.2 Rádio 226

O  $^{226}\text{Ra}$  possui distribuição (Figura 4.24) bastante distinta do  $^{40}\text{K}$ . As maiores concentrações estão localizadas no norte do Estado nas cidades de Joaquim Gomes e Ibateguara, as outras localidades do norte apresentam concentrações próximas à média mundial. Esse padrão se estende até a cidade de Marechal Deodoro, passando por Maceió. A partir de Marechal Deodoro e Pilar em direção ao sul e ao oeste do Estado concentração diminui para valores abaixo da média mundial. Esse padrão se estende até o município de Piaçabuçu no extremo sul de Alagoas.

As atividades de  $^{226}\text{Ra}$  nos solos voltam a ter os mesmos níveis da média mundial a partir de Arapiraca em direção ao sertão. Já não se observa mais o padrão de comportamento do  $^{40}\text{K}$  onde havia uma forte relação com o clima e pluviosidade da região. Uma outra região com atividade de  $^{226}\text{Ra}$  acima da média é observada no município de Batalha, localizado na região central do Estado. No extremo oeste e na divisa com a Bahia os valores de concentração de  $^{226}\text{Ra}$  voltam a cair para valores abaixo da média mundial.

Dessa forma, faz-se mister examinar as características geológicas das cidades de Ibateguara, Joaquim Gomes e Batalha.

Ibateguara possui concentração de  $^{226}\text{Ra}$  acima da média do Estado. O município faz parte da unidade das Superfícies Retrabalhadas que é formada por áreas que têm sofrido retrabalhamento intenso, com relevo bastante dissecado e vales profundos. Na região litorânea de Pernambuco e Alagoas, é formada pelo “mar de morros” que antecede a Chapada da Borborema, com solos pobres e vegetação de Floresta

Hipoxerófila, o clima é do tipo tropical chuvoso com verão seco (CPRM, 2005a). Está a aproximadamente 500m de altitude.

Ibateguara está geologicamente inserido na Província Borborema, representada pelos litótipos dos complexos Cabrobó e Belém do São Francisco.

O Complexo Cabrobó, que é onde a amostra está localizada, expõe xistos, gnaisses, leucognaisses, metarcóseos, metagrauvas e quartzitos (CPRM, 2005a).

A área do município de Ibateguara está inserida no Domínio Hidrogeológico Fissural: Subdomínio Rochas Metamórficas: caracterizado por rochas do embasamento cristalino regionalmente representadas por granulitos do Grupo Girau do Ponciano e pelos complexos gnaissico-migmatítico e migmatítico granítico (Arqueano), rochas vulcano-sedimentares, compostas por quartzitos, micaxistos, gnaissese metavulcânicas diversas do Grupo Macururé e ortognaisses (Proterozóico) (CPRM, 2005a).

Já o relevo do município de Joaquim Gomes faz parte da unidade dos Tabuleiros Costeiros. Esta unidade acompanha o litoral de todo o Nordeste, apresenta altitude média de 50 a 100 metros. Compreende platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas. De modo geral, os solos são profundos e de baixa fertilidade natural (CPRM, 2005b). Como os solos são maduros os elementos químicos encontrados no horizonte A guardam pouca ou nenhuma relação com a geologia.

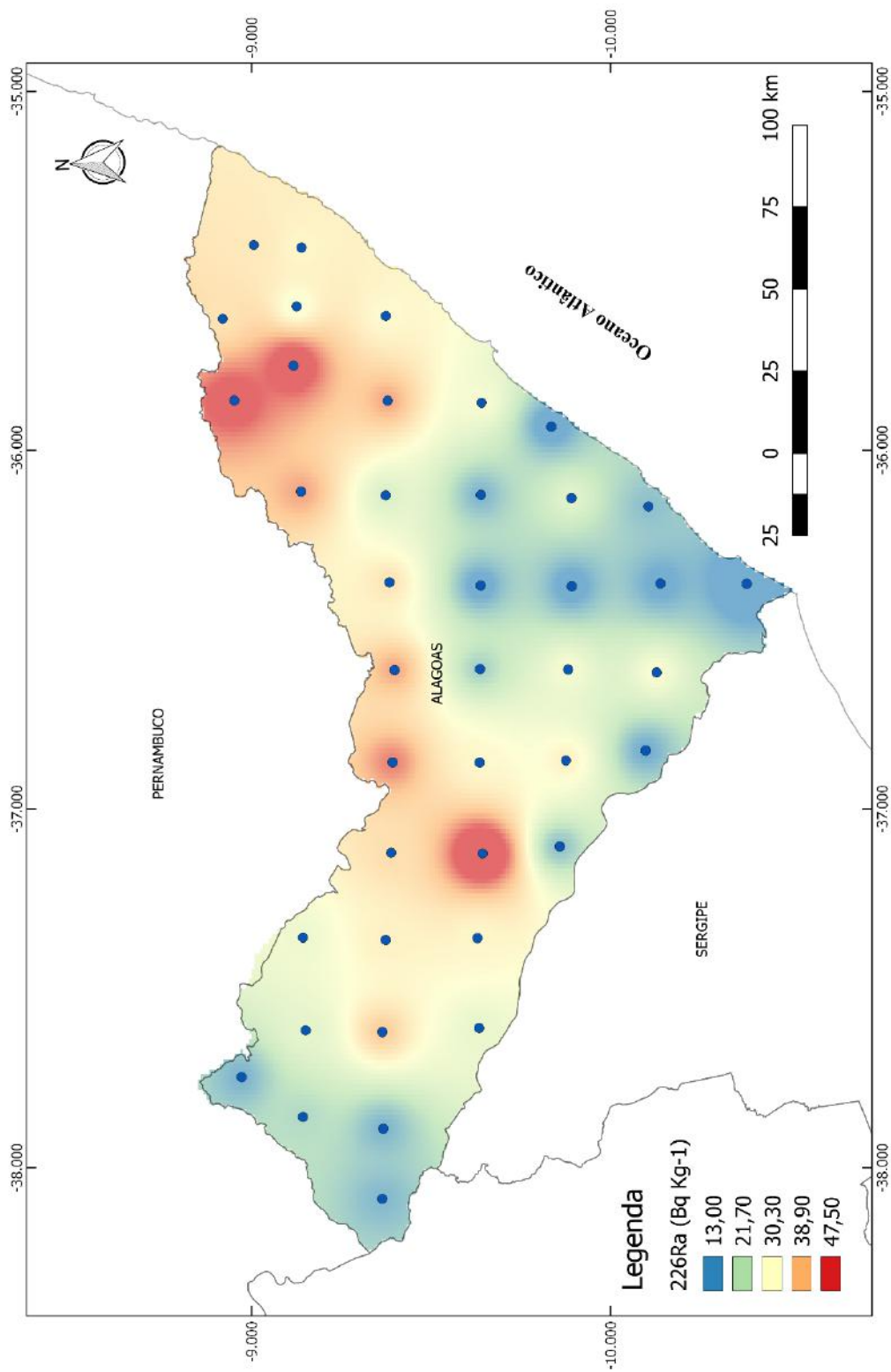


Figura 4.24 Distribuição da concentração de  $^{226}\text{Ra}$  no Estado de Alagoas

O município de Batalha, localizado no sertão alagoano, é outra região que apresentou atividade de  $^{226}\text{Ra}$  acima da média do Estado e acima da média mundial.

O município de Batalha encontra-se geologicamente inserido na Província Borborema está representada nesta localidade pelos litótipos dos Complexos Belém do São Francisco e Marancó e do Grupo Macururé. O Complexo Marancó-Unidade 1, é onde a amostra está localizada, sendo formado por xistos, gnaisses, metagrauvas, metavulcanoclásticas e metamáficas e metaultramáficas.

#### **4.7.3 Rádio 228**

A distribuição da concentração de atividade do  $^{228}\text{Ra}$  (Figura 4.25) guarda alguma similaridade com o  $^{226}\text{Ra}$ . Por exemplo, a amostra do município de Batalha também apresentou atividade acima da média do Estado e acima da média mundial. Outros municípios com concentração mais alta são Girau do Ponciano, localizado no agreste, União dos Palmares, no leste alagoano e Porto de Pedras, localizado no litoral norte alagoano.

A descrição do relevo e geologia do município de Batalha já foi descrito para o  $^{226}\text{Ra}$ . Ou seja, a amostra foi coletada no Complexo Marancó-Unidade 1, sendo formado por xistos, gnaisses, metagrauvas, metavulcanoclásticas e metamáficas e metaultramáficas.

Na sequência segue a descrição da geologia e relevo do município de Girau do Ponciano, que está localizado na região central do Estado de Alagoas. O relevo do município é bastante movimentado, moderadamente dissecados, apresentando altitudes entre 300 e 700 metros, com solos pobres e rasos, salvo nas áreas de fundo de vales estreitos e profundos. Está localizado na Província da Borborema nesse local representada por vários litótipos, entretanto a amostra foi coletada no complexo Girau do Ponciano (Agjp), constituindo-se de ortognaisses TTG. (CPRM, 2005c).

O relevo de União dos Palmares faz parte da unidade dos Tabuleiros Costeiros. Esta unidade acompanha o litoral de todo o Nordeste, apresenta altitude média de 50 a 100 metros. Compreende platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas. De modo geral, os solos são profundos e



de baixa fertilidade natural. Como são solo maduros no horizonte A guardam pouca ou nenhuma relação com a geologia. O relevo de Porto de Pedras também faz parte da unidade dos Tabuleiros Costeiros e, por isso, não faz sentido a avaliação a correlação com a geologia, pois essa não afeta de forma considerável a concentração dos radionuclídeos no horizonte A.

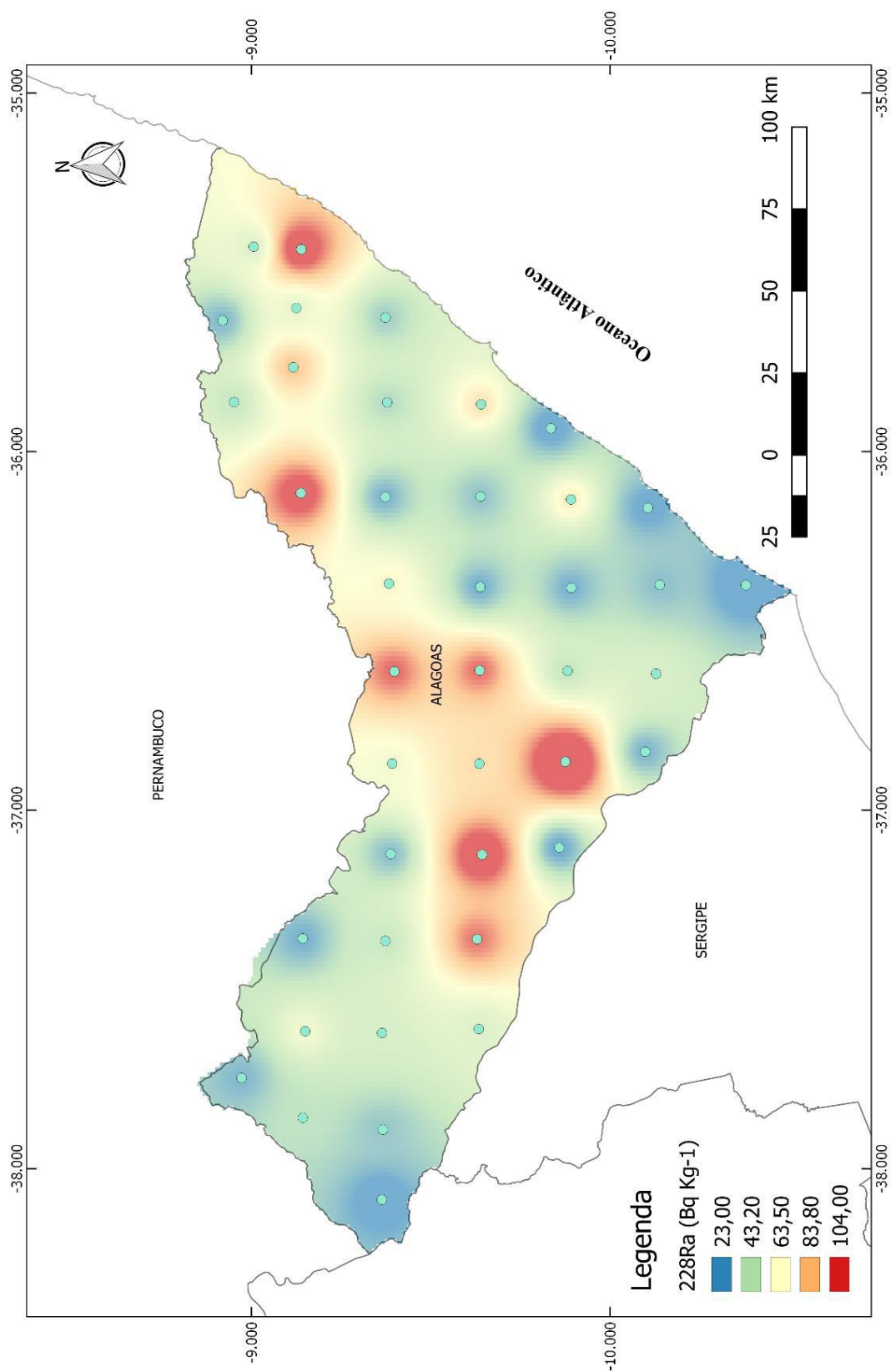


Figura 4.25 Distribuição da concentração de  $^{228}\text{Ra}$  no Estado de Alagoas

#### 4.8 Estimativa da dose externa

A taxa de dose externa no ar foi estimada a partir da atividade específica do  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  nos solos do Estado de Alagoas através da equação 4.1:

$$D_{\text{nat}} = (0,0417 \times C_{40\text{K}}) + (0,462 \times C_{226\text{Ra}}) + (0,604 \times C_{228\text{Ra}}) \quad (4.1)$$

Onde  $D_{\text{nat}}$  é a taxa de dose absorvida em  $\text{nGy h}^{-1}$  no ar a um metro do chão. Os fatores de conversão que correspondem 0,0417 para o  $^{40}\text{K}$ , 0,462 para a série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e 0,604 para a série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  (SAITO, K. & JACOB, 1995). O valor de C corresponde a atividade dos respectivos radionuclídeos em Bq/kg em solo seco.

Tabela 4.16 Estatística descritiva da taxa de dose externa absorvida no ar no Estado de Alagoas

Média ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$71 \pm 3$
Erro padrão	6,19
Mediana ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$70 \pm 3$
Média geométrica ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$59 \pm 2$
Desvio padrão	$40 \pm 2$
Variância da amostra	1572
Percentil 75 ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$94 \pm 2$
Percentil 90 ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$106 \pm 3$
Curtose	0,16
Assimetria	0,53
Intervalo	158
Mínimo ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$8,9 \pm 0,5$
Máximo ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$167 \pm 7$
Contagem	41
Nível de confiança (95,0%)	12

Como pode ser observado na Tabela 4.16, considerando as aproximações do método, a taxa de dose externa no Estado de Alagoas, varia de 8,9 a 167  $\text{nGy h}^{-1}$ , tendo como média 71  $\text{nGy h}^{-1}$  e mediana é 70  $\text{nGy h}^{-1}$ . Já a média geométrica ficou em 59  $\text{nGy h}^{-1}$ . A taxa de dose absorvida no ar no mundo varia em média de 18 a 93  $\text{nGy h}^{-1}$  (os valores máximos chegam a 200  $\text{nGy h}^{-1}$ ) com média de 59  $\text{nGy h}^{-1}$  (UNSCEAR, 2000).

A faixa de valores encontrada para a taxa de dose no ar proveniente dos solos de Alagoas é compatível com a faixa mundial descrita na literatura.

No presente trabalho, a dose equivalente efetiva anual  $E_m$  (mSv.a<sup>-1</sup>) no ar a um metro acima do chão devido a exposição externa (*outdoors*) em locais não abrigados foi calculada a partir da seguinte equação 4.2 (UNSCEAR, 2000):

$$E_m = D_{nat} \times O_f \times 0,7 \times 10^{-6} \quad (4.2)$$

Onde  $O_f$  é o fator de ocupação, ou seja, a fração do ano que um indivíduo do público hipoteticamente é exposto a radiação terrestre. O valor sugerido para  $O_f$  é 20%, isto é, o número de horas de um ano (8.760 horas) multiplicado por 0,2 o que resulta em 1.752 horas por ano de exposição. Esse valor equivale a aproximadamente 4,8 horas de exposição por dia devido a radiação terrestre. O fator 0,7 Sv Gy<sup>-1</sup> é o fator de conversão de dose absorvida no ar para dose efetiva recebida por adultos a altura de um metro do chão (UNSCEAR, 2000).

O cálculo do valor da dose equivalente efetiva (AEDE) ficou no intervalo de 0,01 a 0,20 mSv.a<sup>-1</sup>, tendo como média e mediana o mesmo valor de 0,08 mSv a<sup>-1</sup>. Esse valor é próximo da média anual mundial que é de 0,07mSv, uma vez que a exposição outdoors contribui apenas com 20% do tempo de exposição.

Tabela 4.17 - Estatística descritiva da dose equivalente efetiva anual no ar devido a exposição terrestre no Estado de Alagoas

Média (mSv a <sup>-1</sup> )	0,087
Erro padrão	0,007
Mediana (mSv a <sup>-1</sup> )	0,08
Moda	#N/D
Desvio padrão	0,048
Variância da amostra	0,002
Curtose	0,167
Assimetria	0,535
Mínimo (mSv a <sup>-1</sup> )	0,01
Máximo (mSv a <sup>-1</sup> )	0,205
Contagem	41
Nível de confiança (95,0%)	0,015

O mapa da taxa dose externa no ar devido aos radionuclídeos naturais ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ ) presentes nos solos pode ser visto na Figura 4.26 a 4.28. Como pode-se perceber, as doses no sertão e no agreste são maiores que na região do leste alagoano.

No sertão as maiores taxas de dose são encontradas nos municípios de Batalha, São José da Tapera e municípios vizinhos. Para os demais municípios, a taxa de dose se apresentou praticamente constante no sertão, com valor superior  $100 \text{ nGy h}^{-1}$  na maior parte da sua extensão superficial, sendo a média mundial de  $51 \text{ nGy h}^{-1}$ .

No agreste, a amostra coletada no município de Girau do Ponciano apresentou a maior taxa de dose. Pode-se observar um gradiente negativo da taxa de dose externa proveniente dos solos a medida que se aproxima do leste alagoano. Nessa mesorregião são encontradas as menores taxas de dose do Estado que, na maior parte da sua superfície, não ultrapassa a média mundial.

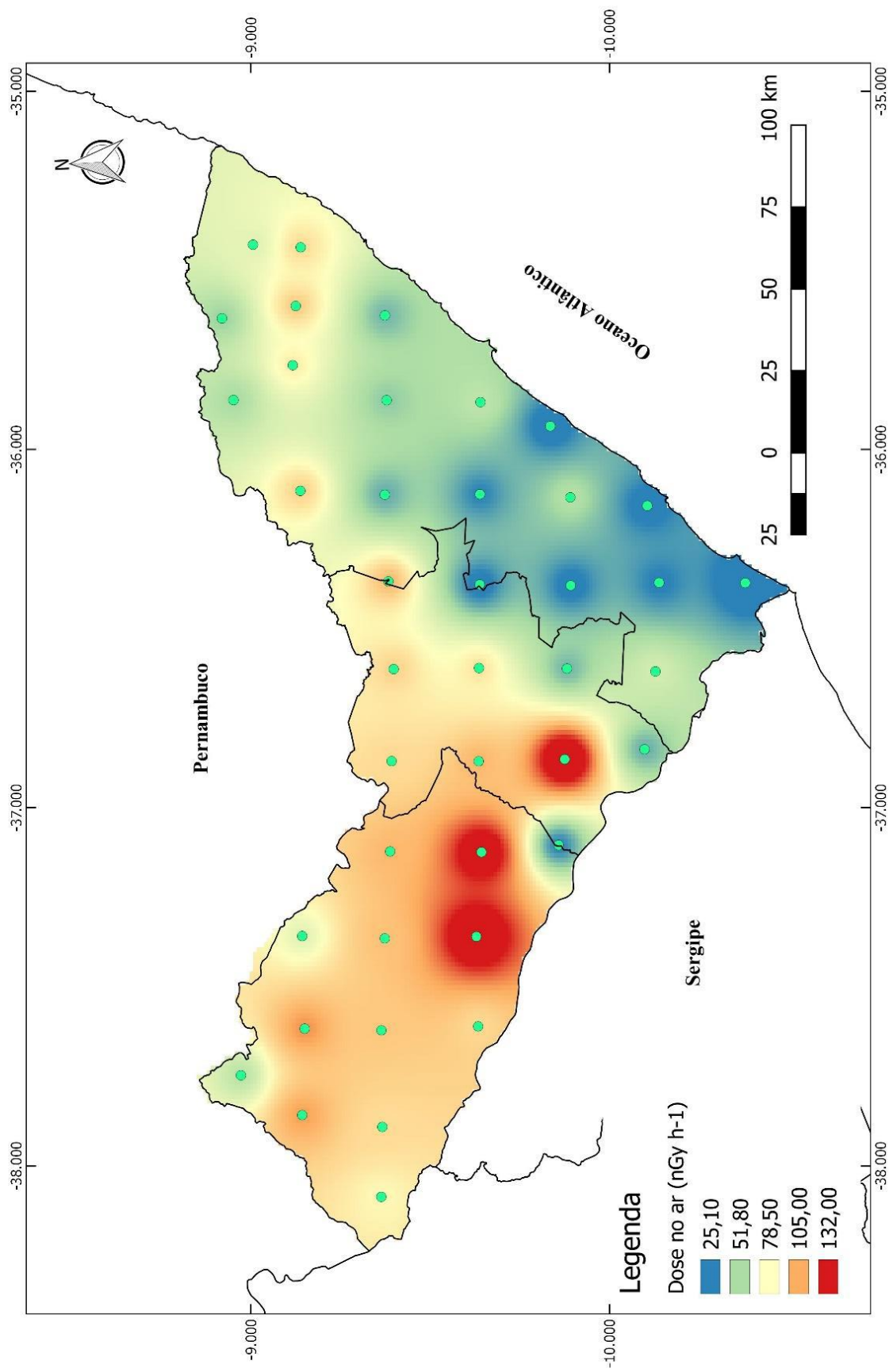


Figura 4.26 Estimativa da taxa de dose externa no ar medida a um metro do solo no Estado de Alagoas

#### 4.9 Avaliação do risco radiológico

Assume-se que a exposição a longo prazo à radiação acarrete riscos de causar câncer. Isso significa que todas as pessoas correm um risco de contrair câncer devido à radiação ionizante natural (QURESHI *et al.*, 2014). O Risco adicional de desenvolver câncer ao longo da vida (*Excess Lifetime Cancer Risk - ELCR*) é o risco extra de se ter câncer devido à exposição a uma substância tóxica incorrida durante a vida de um indivíduo. Esse conceito é definido como os efeitos potenciais carcinogênicos que são caracterizados pela estimativa da probabilidade de incidência de câncer em uma população de indivíduos para uma expectativa de vida específica, a partir de consumos projetados (e exposições) e dados de resposta a doses para produtos químicos específicos (ou seja, fatores de risco). Multiplicando os dados de entrada pelo fator de risco tem-se o ELCR, que é uma probabilidade ou risco adicional de desenvolver câncer devido à exposição a uma substância tóxica incorrida durante a vida de um indivíduo.

Tendo em vista a definição do ELCR, que leva em conta a expectativa de vida de uma população, a dose equivalente efetiva anual e o fator de risco, o índice em questão traz mais informações úteis para estimar o risco a que uma população está exposta devido aos radionuclídeos naturais presentes no solo. Além disso, como a dose equivalente devido aos radionuclídeos naturais não é uniforme no Estado de Alagoas, dessa forma, o cálculo da ELCR é muito útil para estimar o risco adicional de se desenvolver câncer nas três mesorregiões do Estado devido aos radionuclídeos naturais presentes no solo.

A probabilidade de risco adicional de desenvolver câncer para população exposta à radiação nos solos estudados foi calculada com base na dose equivalente efetiva (AEDE) estimada usando a seguinte equação (MATTHEW *et al.*, 2017; RAVISANKAR *et al.*, 2014):

$$\text{ELCR} = \text{AEDE} \times \text{DL} \times \text{RF}, \quad (4.3)$$

onde AEDE é como definido na Eq. 4.2; DL é o tempo de vida (considerado 70 anos para os habitantes de Alagoas) e RF é o fator de risco dado, sendo  $0,05 \text{ Sv}^{-1}$  para efeitos estocásticos em qualquer população.

O ELCR para todo o Estado de Alagoas variou de  $0,38 \pm 0,026 \times 10^{-4}$  a  $7,2 \pm 0,25 \times 10^{-4}$  com média aritmética de  $3,0 \pm 0,12 \times 10^{-4}$ . O valor aceito é de  $2,90 \times 10^{-4}$  (UNSCEAR, 2000). O ELCR está no limite do valor aceito para o Estado de Alagoas como um todo.

Quando o risco é avaliado para todo o Estado de Alagoas, os valores são compatíveis ou ligeiramente superiores aos valores médios mundiais ou valores aceitos. No entanto, devido a maior concentração de radionuclídeos em algumas regiões do Estado, é necessário avaliar o risco radiológico para cada mesorregião. Dessa forma, pode-se avaliar melhor o risco a que cada grupo populacional está exposto.

Os valores dos indicadores de risco radiológico para cada uma das regiões de Alagoas são mostrados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 Avaliação do risco radiológico no leste, agreste e sertão

Mesorregiões	Dose Externa ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	AEDE ( $\text{mSv a}^{-1}$ )	ELCR ( $\times 10^{-4}$ )
Leste	$50 \pm 2,2$	$0,062 \pm 0,003$	$2,17 \pm 0,09$
Agreste	$80 \pm 3,0$	$0,098 \pm 0,004$	$3,4 \pm 0,1$
Sertão	$101 \pm 3,8$	$0,124 \pm 0,005$	$4,3 \pm 0,2$
UNSCEAR (2000)	59	0,07	2,90

A região leste apresentou os indicadores de risco radiológico ligeiramente abaixo da média mundial. O risco radiológico para as regiões do agreste e sertão é superior à média mundial, com valores acima daqueles estabelecidos, apresentando um risco maior devido à radiação natural terrestre para a população residente naquelas regiões. Uma maneira prática de se interpretar os valores de ELCR é que os valores encontrados representam um risco extra devido somente à radiação natural externa proveniente do solo (os outros fatores de riscos de câncer, tais como tabagismo, sedentarismo, bebidas alcoólicas, etc que não são contabilizados). A média mundial é  $2,90 \times 10^{-4}$ , ou seja, existe um risco de 2,9 pessoas para cada 10.000 habitantes de desenvolverem algum tipo de



câncer durante a vida devido a radiação (*outdoors*) proveniente do solo. Esse risco no sertão é de 4,3 pessoas para cada 10.000 desenvolverem câncer ao longo da vida e no agreste o risco de 3,4 pessoas para cada 10.000.

Apesar de o risco de desenvolver câncer ser maior no sertão e agreste do que no litoral, o valor de ELCR (e o próprio desenvolvimento da doença por motivos naturais) não é determinístico, ou seja, não se pode afirmar que a ocorrência de câncer será necessariamente aumentada nas regiões interiores em relação ao litoral. O valor de ELCR no sertão e agreste representa um risco aumentado, isto é, uma probabilidade maior de ocorrência da doença nessas regiões em relação ao litoral e em relação à média mundial.

## Capítulo 5 Conclusão

O presente trabalho apresentou um estudo de mapeamento de baixa densidade de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{Cs}$  cobrindo toda a área de um Estado da Região Nordeste do Brasil. A construção dessa base de dados de concentração de radionuclídeos foi importante para subsidiar futuros estudos geológicos e de geologia médica no Estado de Alagoas.

A concentração do  $^{40}\text{K}$  variou de  $(6 \pm 1) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(2.160 \pm 81) \text{ Bq kg}^{-1}$  (média de  $630 \pm 25 \text{ Bq kg}^{-1}$ ); a concentração do  $^{226}\text{Ra}$  variou entre  $(5,0 \pm 0,4) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(63 \pm 2) \text{ Bq kg}^{-1}$  (média de  $28 \pm 1 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), já a concentração do  $^{228}\text{Ra}$  variou de  $(9,5 \pm 0,5) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(157 \pm 5) \text{ Bq kg}^{-1}$  (média de  $54 \pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ ). A mediana ( $29 \pm 1 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) da concentração do  $^{226}\text{Ra}$  está próxima à mediana mundial ( $35 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), mas os valores da mediana encontrados para o  $^{228}\text{Ra}$  ( $43 \pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) e  $^{40}\text{K}$  ( $420 \pm 25 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) estão acima da mediana mundial ( $30 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $400 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respectivamente) para todo o Estado de Alagoas.

Tendo em vista que as distribuições das concentrações de  $^{40}\text{K}$  e  $^{228}\text{Ra}$  não são normais, os valores médios também podem ser representados por meio das suas respectivas médias geométricas  $250 \pm 25 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $45 \pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Considerando o valor da média geométrica, o  $^{40}\text{K}$  fica abaixo da média mundial, enquanto que o  $^{228}\text{Ra}$  mante-se acima da média mundial.

As concentrações de  $^{137}\text{Cs}$  variaram de  $(0,30 \pm 0,08) \text{ Bq kg}^{-1}$  a  $(1,13 \pm 0,46) \text{ Bq kg}^{-1}$ . A Figura 4.4 no formato *boxplot* mostra a estatística da concentração das amostras de  $^{137}\text{Cs}$ . O valor baixo de concentração de  $^{137}\text{Cs}$  nos solos do Estado de Alagoas é compatível as previsões de que baixos níveis de *fallout* são esperados em regiões equatoriais (UNSCEAR, 1969). Ou seja, os valores encontrados para a concentração do  $^{137}\text{Cs}$  no Estado de Alagoas estão dentro do intervalo de atividade encontrados na literatura para o hemisfério sul. Um resumo estatístico da concentração em  $\text{Bq kg}^{-1}$  de todos os radionuclídeos objeto do presente estudo é apresentado na Tabela 4.3.

A maior concentração de  $^{40}\text{K}$  foi observada nos solos da região do sertão sendo compatível com as maiores concentrações de  $^{40}\text{K}$  em solos do mundo e no sertão de outros Estados da região Nordeste do Brasil.

A alta concentração de  $^{40}\text{K}$  no sertão de Alagoas provavelmente está relacionada às características geológicas e pedológicas; ou seja, fortemente ligadas ao relevo, clima e

geologia da região.

A distribuição de concentração de  $^{40}\text{K}$  variou de forma significativa entre as mesorregiões. O leste alagoano apresentou concentrações mais baixas de  $^{40}\text{K}$  e o sertão altas concentrações. A região agreste é caracterizada por uma região de transição com valores de concentração de  $^{40}\text{K}$  entre os encontrados no leste alagoano e no sertão. Não houve variações importantes da concentração de  $^{226}\text{Ra}$  em relação às mesorregiões. Já o  $^{228}\text{Ra}$  apresentou um pequeno aumento no agreste em relação à região leste e ao sertão.

As distribuições da concentração dos radionuclídeos do Estado podem ser melhor observadas nas Figura 4.23 a 4.25.

Os mapas radiológicos elaborados para os radionuclídeos naturais  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  permitem uma visualização espacial das suas concentrações e comparação com outros mapas do Estado, tais como, mesorregiões, tipos de solo, relevo, entre outros.

A fim de buscar o estabelecimento de padrões de concentração para os radionuclídeos naturais, os mesmos foram agrupados de acordo com o nível de similaridade da concentração empregando o *software* SPSS que utilizou a distância euclidiana quadrática para definir o distanciamento entre os dados e a ligação média entre os grupos.

Os grupos podem ser encontrados nos dendrograma Figura 4.6 a 4.8. As concentrações das amostras dos grupos foram comparadas com informações ambientais das amostras como: relevo, amplitude, declividade, tipo de solo no primeiro e segundo níveis, vegetação e uso do solo.

Para o  $^{40}\text{K}$ , o grupo 1 apresentou uma predominância para os Argissolos e Latossolos; regiões leste e agreste alagoano e para a classe de rocha sedimentar e metamórfica. Já o grupo 2 apresentou predominância com os Neossolos e Planossolos; com o sertão e com as rochas ígneas e metamórficas. Nenhuma correlação mais específica foi encontrada nos subgrupos.

Nenhuma predominância relacionada ao tipo de relevo, amplitude, declividade, tipo de solo no primeiro e segundo níveis, vegetação e uso do solo foram observadas entre os grupos estabelecidos para o  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ .

Grupos da relação entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  também foram formados, conforme pode ser verificado na Figura 4.9. Os três grupos obtidos foram comparados com várias informações da matriz de dados, entretanto nenhuma correlação importante foi observada para todos os radionuclídeos em relação às características citadas.

A correlação entre as concentrações dos radionuclídeos naturais foi também realizada sem o agrupamento. Foi observado que existe uma correlação moderada entre  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  ( $R^2 = 0,32$ ), com correlação positiva ( $y = 1,51x$ ) para todo o estado de Alagoas. Mais especificamente no sertão, há uma correlação forte ( $R^2 = 0,58$ ) e positiva ( $y = 1,84x$ ) entre o  $^{228}\text{Ra}$  e o  $^{226}\text{Ra}$ . Por outro lado, existe uma correlação fraca ( $R^2 = 0,17$ ) no Agreste. Uma correlação moderada ( $R^2 = 0,35$ ) e positiva ( $y = 1,29x$ ) entre o  $^{228}\text{Ra}$  e o  $^{226}\text{Ra}$  na região leste também foi observada, conforme mostrado nas Figura 4.10 a 4.14.

Em relação aos valores concentração para cada tipo de solo do Estado de Alagoas, o teste não paramétrico U de Mann-Whitney foi utilizado para a inferência estatística sobre as diferenças entre os tipos de solo.

A concentração de  $^{40}\text{K}$  nos Argissolos Amarelos se diferenciou de todos os tipos de solo com exceção dos Latossolos. Os Argissolos Vermelho-Amarelos também apresentaram diferença significativa de atividade de  $^{40}\text{K}$  em relação às amostras de Neossolos Regolíticos, Planossolos Háplicos e os Latossolos no presente estudo. Por outro lado, não foi mostrada diferença significativa entre as atividades medidas nos Neossolos Litólicos se comparadas com os Argissolos Vermelho-Amarelos, Neossolos Regolíticos e Planossolos Háplicos. Da mesma forma, não foi apresentada diferença estatística significativa da atividade específica de  $^{40}\text{K}$  entre os Neossolos Regolíticos e os Planossolos Háplicos.

Em relação ao  $^{226}\text{Ra}$ , não foi observada diferença estatística relevante entre os valores de concentração medidos nos diversos tipos de solos estudados no Estado de Alagoas. Entretanto, para a concentração de  $^{228}\text{Ra}$  foram observadas diferenças entre os Planossolos Háplicos (SX) em relação aos: Argissolos Amarelos (PA) e os Neossolos Regolíticos (RR). A comparação entre os tipos de solo pode ser melhor observada nas Tabela 4.7 a 4.9.

Em relação ao  $^{137}\text{Cs}$ , a maioria das amostras com concentração acima do AMD se localizaram paralelas à costa a uma distância de aproximadamente 50 Km. Uma possível

explicação para esse comportamento sejam as chuvas orográficas da região devido à elevação no relevo, principalmente devido ao Planalto da Borborema. As outras duas amostras onde os valores de concentração ficaram acima do AMD estão localizadas em área (próxima a Maceió) que apresenta alto índice pluviométrico.

Embora uma alta concentração de  $^{40}\text{K}$  seja observada no solo do sertão, este radionuclídeo não é o principal responsável para a contribuição da dose equivalente efetiva. As contribuições para a dose equivalente efetiva são de 45,3% para o  $^{228}\text{Ra}$ ; 36,7% para o  $^{40}\text{K}$  e 18,0% para o  $^{226}\text{Ra}$ .

A dose absorvida no ar e, conseqüentemente, a dose equivalente efetiva anual (AEDE) no sertão e no agreste são superiores à média mundial. A população que vive no agreste tem um ELCR de  $3,4 \pm 0,1 \times 10^{-4}$ , enquanto a população residente no sertão tem um ELCR de  $4,3 \pm 0,2 \times 10^{-4}$ . Já a população que vive no leste alagoano possui um ELCR de  $2,17 \pm 0,09 \times 10^{-4}$ .

Em outras palavras, no sertão alagoano existe um risco de 4,3 pessoas para cada 10.000 habitantes de desenvolverem algum tipo de câncer durante a vida devido a radiação (outdoors) proveniente do solo ou, de outra forma, um risco adicional de aproximadamente 0,04% no sertão, 0,03% no agreste e 0,02% no leste alagoano.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros que associem a geologia com a concentração de radionuclídeos em solos jovens da região Nordeste do Brasil devem ser conduzidos, uma vez que as características desses solos estão fortemente relacionadas à rocha matriz (LEPSCH, 2002). Da mesma forma, um estudo mais aprofundado sobre a influência do Planalto da Borborema na concentração dos radionuclídeos naturais e  $^{137}\text{Cs}$  na região Nordeste seria recomendado.

Futuros estudos em relação à concentração de  $^{137}\text{Cs}$  em solos do Nordeste devem ser realizados para avaliar se as chuvas orográficas de fato contribuem para deposição do  $^{137}\text{Cs}$  em solos próximos às elevações do Planalto da Borborema.

Um estudo sobre o mapeamento do  $^{40}\text{K}$  em todo o sertão nordestino seria relevante.

Seria importante verificar se o aumento da concentração de  $^{228}\text{Ra}$  no agreste está relacionado a fatores geológicos ou com uma possível adubação devido ao cultivo de

fumo na região do agreste. Da mesma forma, embora não se tenha verificado alta concentração de radionuclídeos em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, seria recomendável um estudo comparativo entre as áreas com cultivo de cana-de-açúcar e áreas com mínimo impacto antrópico, de preferência em áreas próximas (leste alagoano), tomando-se como referência os mesmos tipos de solos.

## Capítulo 6 Referências Bibliográficas

- ALAGOAS, E. DE. *Alagoas em Mapas*. . Maceió: [s.n.], 2014.
- ALAZEMI, N. *et al.* Soil radioactivity levels, radiological maps and risk assessment for the state of Kuwait. *Chemosphere*, n. 154, p. 55–62, 2016.
- ALENCAR, A. S. & FREITAS, A. C. Reference levels of natural radioactivity for the beach sands in a Brazilian southeastern coastal region. *Radiation Measurements*, v. 40, p. 76–83, 2005.
- AMARAL, E. C. S. *Modificação da exposição à radiação natural devido a atividades agrícolas numa área de radioatividade natural elevada no Brasil*. 1992. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992.
- AMARAL, R.; MAZZILLI, B. *Avaliação do equilíbrio entre o  $^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}$  e a relação  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$  no capeamento (solo) de jazidas fosfáticas em Pernambuco*. *Anais International Nuclear Atlantic Conference*. Santos - SP: [s.n.], 1997. Disponível em: <[https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/1997/ENAN/E03\\_015.PDF%0D](https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/1997/ENAN/E03_015.PDF%0D)>.
- ANDRELLO, A. C., APPOLONI, C. R. Spatial variability and Cesium-137 inventories in native forest”. *Brazilian Journal of Physics*, v. 34, p. 800–803, 2004.
- ANDRELLO, A. C.; APPOLONI, C. R.; GUIMARÃES, M. F. Uso do céσιο- 137 para avaliar taxas de erosão em cultura de soja, café e pastagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 223–229, 2003.
- ANDRELLO, A. C.; APPOLONI, C. R. Inventário de  $^{137}\text{Cs}$  em áreas de solo não-perturbado da região de Londrina, Paraná, Brasil. 2005, Santos: [s.n.], 2005.
- ANTUNES, P. D. *et al.* Distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  em três solos representativos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 935–943, 2010.
- BACCHI, O. O. S. . *et al.* Soil erosion evaluation in a small watershed in Brazil through  $^{137}\text{Cs}$  fallout redistribution analysis and conventional models. *cta Geologica Hispanica*, v. 35, p. 251–259, 2000.

BÉ, M. M. *et al.* *Table of Radionuclides*. Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, França. Sèvres: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.bipm.org/utis/common/pdf/monographieRI/Monographie\\_BIPM-%0A5\\_Tables\\_Vol7.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/monographieRI/Monographie_BIPM-%0A5_Tables_Vol7.pdf)>. , 2010

BOCEGATO V. A., *Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas do noroeste do estado do paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados*, Universidade Federal do Paraná, 2005.

BOURDON, B. Introduction to U-series Geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 52, n. 1, p. 1–21, 1 jan. 2003. Disponível em: <<http://rimg.geoscienceworld.org/cgi/doi/10.2113/0520001>>.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 420. 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf>>.

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)*. 2012. 102 f. 2012. Disponível em: <<https://bdtd.ufs.br/handle/tede/1991>>.

CARDOSO, G. V *et al.* Geoquímica de radionuclídeos naturais em solos de áreas circunvizinhas a uma unidade de mineração e atividade de urânio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1909–1917, 2009.

CASTRO, A. Cinética e equilíbrio secular das principais séries radioativas e suas implicações ambientais. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, 2016.

CONCEIÇÃO, F. T. *Comportamento geoquímico de radionuclídeos e metais pesados em solos da bacia do Rio Corumbataí - SP*. 2004. 146 f. UNESP, 2004.

CPRM. *Diagnóstico Do Município de Ibataguara*. . [S.l: s.n.], 2005a.

CPRM. *Diagnóstico Do Município de Joaquim Gomes*. . [S.l: s.n.], 2005b.

CPRM. *Diagnóstico do Município Girau do Ponciano*. . [S.l: s.n.], 2005c.

CPRM. *Manual Técnico PGAGEM - Brasil*. . [S.l: s.n.], 2003.



CPRM. *MAPA GEODIVERSIDADE DO ESTADO DE ALAGOAS*. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>>. , 2015

CREMERS, A. *et al.* Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils. *Nature*, v. 335, n. 6187, p. 247–249, 15 set. 1988. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/10.1038/335247a0>>.

DALRYMPLE, G. BRENT; LANPHERE, M. A. *Potassium-argon dating: principles, techniques and applications to geochronology*. 1969. 258 f. 1969.

DAVIES, J. J. Cesium and its relationship to potassium in ecology. *Radioecology*, p. 539–556, 1963.

DOS SANTOS, R. N., MARQUES, L. S., RIBEIRO, F. B. Estudo do equilíbrio radioativo das séries do U-238 e Th-232 em rochas vulcânicas das ilhas da Trindade e de Martim Vaz. *Geochimica Brasiliensis*, v. 14, n. 1, p. 135–153, 2000.

DUMAT, C.; STAUNTON, S. Reduced adsorption of caesium on clay minerals caused by various humic substances. *J. Environ. Radioact.*, v. 46, p. 187–200, 1999.

EISENBUD, M.; GESELL, T. *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources*. [S.l: s.n.], 1997.

EMBRAPA. *Climatologia do Estado de Alagoas. Boletim de Pesquisa Número 9 - Embrapa*. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT-2010/4779/1/Bp-023.pdf>>. , 2012a

EMBRAPA. *Climatologia do Estado de Alagoas. Boletim de Pesquisa Número 9 - Embrapa*. [S.l: s.n.]. , 2012b

EMBRAPA. *Solos do Nordeste*. . Recife, PE: [s.n.], 2014.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. [S.l: s.n.], 2006.

EMBRAPA SOLOS. *Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Alagoas Zoneamento Agroecológico do Estado de Alagoas*

*Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Alagoas Relatório Técnico.* . Recife, PE: [s.n.], 2012.

EMBRAPA SOLOS. *Mapa de Reconhecimento de Baixa e média de solos do Estado de Alagoas.* . [S.l: s.n.]. , 2011

EMICO OKUNO; YOSHIMURA, E. M. *Física das Radiações.* 1. ed. [S.l.]: OFICINA DE TEXTOS, 2010.

FUJIYOSHI, R., SAWAMURA, S. Mesoscale variability of vertical profiles of environmental radionuclides (40 K, 226 Ra, 210 Pb and 137Cs) in temperate forest soils in Germany. *Total Environ*, v. 320, n. 2, p. 177 a 188, 2014.

GARCÊZ, W. D. R. *Determinação das atividades específicas de Ra, Ra e K em amostras de fertilizantes minerais.* 2016. 2016.

GHASEMI, A.; ZAHEDIASL, S. Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, v. 10, n. 2, p. 486–489, 1 dez. 2012. Disponível em:

<[http://www.endometabol.com/?page=article&article\\_id=3505](http://www.endometabol.com/?page=article&article_id=3505)>.

GUIMARÃES, M. F. *137Cs da precipitação radioativa (“fallout”) no estudo da erosão e sedimentação de solo.* 1988. 136p f. ESALQ/USP Piracicaba, SP, 1988.

HEILBRON FILHO; LAVALLE, P. F. *Segurança Nuclear e Proteção ao Meio Ambiente.* [S.l.]: e-papes, 2004.

HIROMOTO, G., PERES, A. C., TADDEI, M. H., SOARES, M. R. & ALLEONI, L. R. F. Annual International conference on Soils, Sediments, Water and Energy. 2007, [S.l: s.n.], 2007. p. 198–200.

IBGE. *Resolução Nº 05, de 10 de outubro de 2002.* . [S.l: s.n.]. , 2002

IBGE. *Sinopse do Censo Demográfico.* Rio de Janeiro: [s.n.], 2011.

JACOMINE, P. KLINGER T. A NOVA CLASSIFICAÇÃO BRASILEIRA DE SOLOS. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica.* Recife: [s.n.], 2008. p. 161–179.

- JENNY, H. *Factors of soil formation*. [S.l: s.n.], 1941.
- KETCHAM, R. A. An improved method for determination of heat production with gamma-ray scintillation spectrometry. *Chemical Geology*, v. 130, p. 175–194, 1996.
- KHATER, E. M. A.; HIGGYA, R. H.; PIMPL, M. Radiological impacts of natural radioactivities in Abu-Tartor phosphate deposits. *J. Environ. Radioactivity*, v. 55, p. 255–267, 2001.
- KNOLL, G. F. *Radiation detection and measurement*. 4. ed. [S.l: s.n.], 2010.
- LAUBENSTEIN, M. *et al.* Radionuclide mapping of the Molise region (Central Italy) via gamma-ray spectrometry of soil samples: relationship with geological and pedological parameters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 298, n. 1, p. 317–323, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10967-012-2353-2>>.
- LAURIA, D. C., RIBEIRO, F. C. A., CONTI, C. C., L. Radium and uranium levels in vegetables grown using different farming management systems”. *Journal of Environmental Radioactivity*. *Journal of Environmental Radioactivity*, n. 100, p. 176–183, 2009.
- LAURIA, D. C. *Transporte de radionuclídeos naturais e elementos das terras raras leves no sistema lagunar de Buena, RJ*. 1999. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.
- LEPSCH, I. F. *Formação e Conservação dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- LINSALATA, P. *et al.* An assessment of soil-to-plant concentration ratios for some natural analogues of the transuranic elements. *Health Physics*, v. 56(1), p. 33–46, 1988.
- LOPES, J. M. *Dose Efetiva Devido à Ingestão de Radionuclídeos Contidos nos Alimentos da Dieta da População do Município do Rio de Janeiro*. 2018. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2018.
- MABIT, L.; BERNARD, C. Relationship between soil <sup>137</sup>Cs inventories and chemical properties in a small intensively cropped watershed. *Comptes Rendus de l'Académie des*

*Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, v. 327, n. 8, p. 527–532, 1998.

Disponível em

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1251805099800342>>.

MALANCA, A., PESSINA, V., DALLARA, G. Assessment of the natural radioactivity in the Brazilian State of Rio Grande do Norte. *Health Physics*, v. 65, n. 3, p. 289–302, 1993.

MARIZ, C. H. (ELETRONUCLEAR). Seminário Nacional de Energia Nuclear. 2011, [S.l: s.n.], 2011. p. 32.

MATTHEW, K. *et al.* Radionuclide concentrations and excess lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in tailing enriched soil around Maiganga coal mine, Northeast Nigeria. *International Journal of Radiation Research*, v. 15, p. 71–80, 2017.

MAZZILLI, B. P.; MÁDUA, M. FRANCIS; PIRES DE CAMPOS, M. *Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental*. . São Paulo: [s.n.], 2011.

MELO DE OLIVEIRA, L. A. (DNPM). *Potássio*. . [S.l: s.n.], 2008.

PAIVA, C. T. DE. *ESTUDO DA MOBILIDADE E DISPERSÃO de <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>222</sup>Rn E METAIS PESADOS NO SISTEMA SOLO-ROCHA DO DEPÓSITO DE U-ETR DE SÃO JOSÉ DE ESPINHARAS (PB)*. 2008. 223 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

PEIXOTO, C. M. *Determinação dos valores de referência de qualidade de solo para U e Th no Estado de Minas Gerais*. 2013. 144 f. CNEN, 2013.

PERES, A. C. *Modelo para o estabelecimento de valores orientadores para elementos radioativos no solo*. 2007. 125 f. USP, 2007.

PFEIFFER, W. C. *et al.* Measurements of environmental radiation exposure dose rates at selected sites in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 53, n. n. 4, p. 683–691, 1981.

PIOCH, M. *Contribution à l'Étude du Devenir, en Milieu Urbain, pendant le Ruissellement des Eaux Pluviales, des Produits de Fission Émis en Cas d'Accident*

*Nucléaire*. 1993. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Département de Protection de l'Environnement et des Installations, Centre d'Études de Cadarache, 1993.

QURESHI, A. A. *et al.* Evaluation of excessive lifetime cancer risk due to natural radioactivity in the rivers sediments of Northern Pakistan. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, v. 7, n. 4, p. 438–447, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1687850714000661>>.

RAMALHO, J. F. G. P., AMARAL SOBRINHO, N. M. B., VELLOSO, A. C. X. ACÚMULO DE METAIS PESADOS EM SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR PELO USO CONTÍNUO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA E ÁGUA DE IRRIGAÇÃO. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 1993. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218348025>>.

RAVISANKAR, R. *et al.* Multivariate statistical analysis of radiological data of building materials used in Tiruvannamalai, Tamilnadu, India. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 85, p. 114–127, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804313005952>>.

RIBEIRO, F. C. A. *et al.* Concentration of fallout Cesium-137 in soils of the Rio de Janeiro State, Brazil. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 4, n. 2, 23 nov. 2016. Disponível em: <<http://www.bjrs.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/view/236>>.

RIBEIRO, F. C. A. *ISÓTOPOS RADIOATIVOS EM SOLOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: VALORES DE REFERÊNCIA, DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E CORRELAÇÃO COM FATORES AMBIENTAIS*. 2016. 188 f. CNEN, 2016.

RIBEIRO, F. C. A. *et al.* Mapping soil radioactivity in the Fernando de Noronha archipelago, Brazil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 311, n. 1, p. 577–587, 2017.

SAITO, K. & JACOB, P. Gamma-ray fields in the air due to sources in the ground. *Radiation Protection and Dosimetry*, n. 58, p. 29–45, 1995.

SANTOS JUNIOR, J. A. DOS *et al.* Analysis of the Spectrometry K Levels in Soil using Gamma. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 48, n. October, p. 221–228,

2005.

SANTOS JÚNIOR, J. A. *Avaliação Radiométrica do U-238, R-226, Th-232 e K-40 em uma Área Anômala do Agreste de Pernambuco*. 2009. 139 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

SCHUCH, L. . *Césio-137 e radionuclídeos naturais em solos do sul do Brasil e em solos e outras amostras ambientais da Antártica*. 1993. 185 f. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993. Disponível em:  
<[marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.../publicacaoLASchuch.pdf](http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.../publicacaoLASchuch.pdf)>.

SCHULLER, P. . *et al.* Global fallout <sup>137</sup>Cs accumulation and vertical migration in selected soils from South Patagonia. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 71, p. 43–60, 2004.

SELINUS, O. *Geologia Médica*. [S.l: s.n.], 2006. v. 1.

SUPERINTENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DA INFORMAÇÃO E DO CONHECIMENTO. *Mapa das Mesorregiões do Estado de Alagoas*. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://dados.al.gov.br/dataset/mesorregioes-do-estado-de-alagoas/resource/190dc552-a293-46ad-9e47-a12d1a4358e2>>. , 2015

TAYLOR, S. R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 28, n. 8, p. 1273–1285, ago. 1964. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90129-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90129-2)>.

TOLEDO, M. C. M. DE. Intemperismo e pedogênese. *Geologia*. [S.l.]: USP/UNIVESP/EDUSP, 2014. .

UGUR, F. A. *et al.* A survey of distribution of terrestrial radionuclides in surface soil samples in and around the Osmaniye province, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 154, n. 4, p. 483–489, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/rpd/ncs259>>.

UMISEDO, N. K. *Dose de radiação ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas*. 2007. Universidade de São Paulo, 2007.

UNSCEAR. *Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects: 1982 Report to the*

*General Assembly*. . New York: [s.n.], 1982.

UNSCEAR. *Report. Annex A: Radioactive contamination of the environment by nuclear tests*. . New York: [s.n.], 1969.

UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. [S.l: s.n.], 2000. v. I. Disponível em: <[http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf)>.

UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation: Sources Annex B. Exposures of the Public and Workers from Various Sources of Radiation. United Nations Publications*. [S.l: s.n.], 2008.

VEIGA, R. S. *et al.* Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands. *Radiation Measurements*, v. 41, p. 189–196, 2006.

YASUNARI, T. J. *et al.* Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 108, n. 49, p. 19530–4, 6 dez. 2011. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22084074>>. Acesso em: 21 fev. 2018.

ZYGMUNT, J.; CHIBOWSKI, S.; KLIMOWICZ, Z. The effect of sorption properties of soil minerals on the vertical migration rate of cesium in soil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 231, n. 1, p. 57–62, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02388005>>.