

MAPA DE RISCO DE EXPOSIÇÃO AO GÁS RADÃO DAS ILHAS DO ARQUIPÉLAGO: MADEIRA PORTO SANTO

**CONTRATO INTERADMINISTRATIVO DE COOPERAÇÃO
ENTRE A SECRETARIA REGIONAL DE AMBIENTE, RECURSOS
NATURAIS E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E A UNIVERSIDADE DE
COIMBRA**

RELATÓRIO N.º 3 (cláusula 4.a) – FINAL

–

Contrato n. 1-SRAAC/DRAAC-UC/FCT

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade de Coimbra

Mês setembro 2024

Equipa Técnica

Prof. Alcides Pereira – Coordenador

Doutor Sérgio Sêco

Mestre Gustavo Santiago

Mestre Filipa Domingos

Mestre José Erbolato Filho

Índice

1. Introdução	5
2. Enquadramento Geológico	6
3. Métodos e técnicas	12
3.1. Determinação de isótopos emissores gama em sólidos	12
3.2. Determinação da taxa de débito de dose por exposição à radiação gama	15
3.3. Determinação da concentração do gás radão no ar interior	18
4. Resultados obtidos	20
4.1. Globais	20
4.2. Por ilha	21
4.2.1. Taxa de dose por exposição à radiação gama – Medição Direta	21
4.2.2. Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais Ra-226, Th-232 e K-40	22
4.2.3. Taxa de dose por exposição à radiação gama – Calculada	25
4.2.4. Concentração de urânio em amostras de rocha	26
4.2.5. Concentrações de atividade do gás radão no ar interior	27
4.3. Dados por ilha e por unidade geológica	28
4.3.1. Ilha da Madeira	28
4.3.1.1. Taxa de dose por exposição à radiação gama – Medição direta	28
4.3.1.2. Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais Ra-226, Th-232 e K-40	29
4.3.1.3. Taxa de dose por exposição à radiação gama - calculada	32
4.3.1.4. Concentrações de atividade do gás radão no ar interior	33
4.3.2. Ilha do Porto Santo	34
4.3.2.1. Taxa de dose por exposição à radiação gama – Medição direta	34
4.3.2.2. Concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais Ra-226, Th-232 e K-40	35
4.3.2.3. Taxa de dose por exposição à radiação gama - calculada	38
4.3.2.4. Concentração de atividade do gás radão no ar interior	39
5. Análise da distribuição espacial dos dados obtidos	40
5.1. Ilha da Madeira	40
5.2. ILHA DO PORTO SANTO	43
6. Concentração de radão no ar e as características da habitação	47
6.1. Efeito do declive do terreno na concentração do gás radão no ar interior	50

7. Mapa de risco de exposição ao gás radão.....	52
7.1. Método da classificação binário.....	52
8. Mapa de suscetibilidade de exposição ao gás radão	58
9. Considerações finais.....	60
10. Referências bibliográficas.....	61
11. ANEXO A – Cartografia geológica adotada	62
11.1. A.1 – Carta Geológica simplificada da Madeira à escala 1:80 000 (LNEG, 2009).....	63
11.2. A.2 – Carta Geológica adaptada de Porto Santo à escala 1:80 000 (LNEG, 1996; 2009)	64
12. ANEXO B – Dados em bruto	65
12.1. B.1 – Dados de radiação externa e das concentrações dos radionuclídeos naturais	65
12.2. B.2 – Dados das concentrações de Radão-222 no ar interior de edifícios	70
13. ANEXO C – Índice de suscetibilidade ao gás radão por freguesia	79

1. INTRODUÇÃO

Ao abrigo de contrato (1-SRAAC/DRAAC-UC/FCT) entre a Direção do Ambiente e das Alterações Climáticas da Madeira (DRAAC) e a Universidade de Coimbra, e neste último caso, sob responsabilidade do Laboratório de Radioatividade Natural (LRN-UC), foram efetuados trabalhos com vista à elaboração dos mapas de suscetibilidade ao gás radão nas principais ilhas do arquipélago (Madeira e Porto Santo). De acordo com os termos do mesmo contrato, os mapas em causa devem ser elaborados à escala 1:80 000 e procurando seguir, na medida do possível, a metodologia adotada em trabalhos similares conduzidos no espaço do território continental.

Para o efeito, foi utilizada informação já disponível e composta por dados relativos a medições da concentração de gás radão no ar interior de edifícios localizados nas ilhas em apreço (obtidos numa campanha resultante de uma parceria entre a DRAAC e a Agência Internacional de Energia Atómica - AIEA) e, dados de campo e de laboratório obtidos no decorrer dos trabalhos. De acordo com o plano inicial, projetava-se a aquisição de informação complementar no que respeita à concentração do radão em habitações, mas também de *proxies* geogénicas para avaliação da suscetibilidade do substrato rochoso (*i.e.*, taxa de dose por exposição à radiação gama, concentração de atividade dos radioisótopos presentes nos materiais geológicos e ainda, de radão nos solos). Após os primeiros testes realizados no campo conclui-se que pela natureza dos solos nas ilhas (em geral residuais e compostas por rocha pouco alterada ou desagregada), não seria possível obter a informação desejada e com a dispersão geográfica necessária. Em alternativa, incrementou-se significativamente o número de locais de amostragem para medição dos radioisótopos nos materiais geológicos, para obtenção de dados adicionais sobre o progenitor direto do radão (Ra-226).

Toda a informação obtida foi organizada numa base geográfica e modelada de acordo com o procedimento adaptado e aplicado no território continental.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

Atendendo ao objetivo central do trabalho o foco da discussão do enquadramento geológico do trabalho centra-se mais na variabilidade litológica dos materiais do que em questões que se relacionam com o seu enquadramento temporal ou génese. Acresce que, tal como incluído nos termos do contrato, o mapa a elaborar no final deve ter por base a cartografia publicada à data e na escala 1: 80 000 [Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), 2009].

Em ambas as ilhas, dominam as rochas vulcânicas que lhes deram origem, sendo mais antigas na Ilha do Porto Santo (ca. 19 Ma) do que na Ilha da Madeira (maior atividade nos últimos 5 Ma). As duas ilhas distinguem-se em dimensão, morfologia (nos dois casos com maior expressão na Madeira) e no enquadramento geológico; neste último caso o vulcanismo submarino é bem expresso na Ilha do Porto Santo enquanto que na Madeira, dominam unidades associadas a vulcanismo subaéreo. No Porto Santo, mais arrasada pela erosão, parte substancial do substrato vulcânico está coberta com unidades sedimentares recentes (miocénicas ao Quaternário).

No que respeita à Ilha da Madeira são reconhecidos e cartografados 6 complexos (designados de B1 a B6) onde são claramente dominantes as rochas basálticas de natureza alcalina, maioritariamente sobre a forma de escoadas, por vezes em camadas espessas, ou intercaladas com material piroclástico. São também abundantes rochas filonianas, maioritariamente também de natureza basáltica. De acordo com a idade e características dos materiais agrupam-se os diferentes complexos, como se descreve (Fig. 1):

- i) B1 – Complexo de Base: piroclastos com intercalações basálticas de idade entre 2,5 e 5 Ma;
- ii) B2 a B4 – Complexos intermédios: sequências lávicas com intercalações piroclásticas, separadas por níveis de erosão; idade entre 2.5 e 1 Ma;
- iii) B5 e B6 – Complexos superiores: derrames lávicos locais, com intercalação de piroclastos (1 a 0.0006 Ma);
- iv) São ainda reconhecidos e cartografados materiais de natureza sedimentar de idade quaternária (cascalheiras, fluviais e marinhas, aluviões e areias de praia).

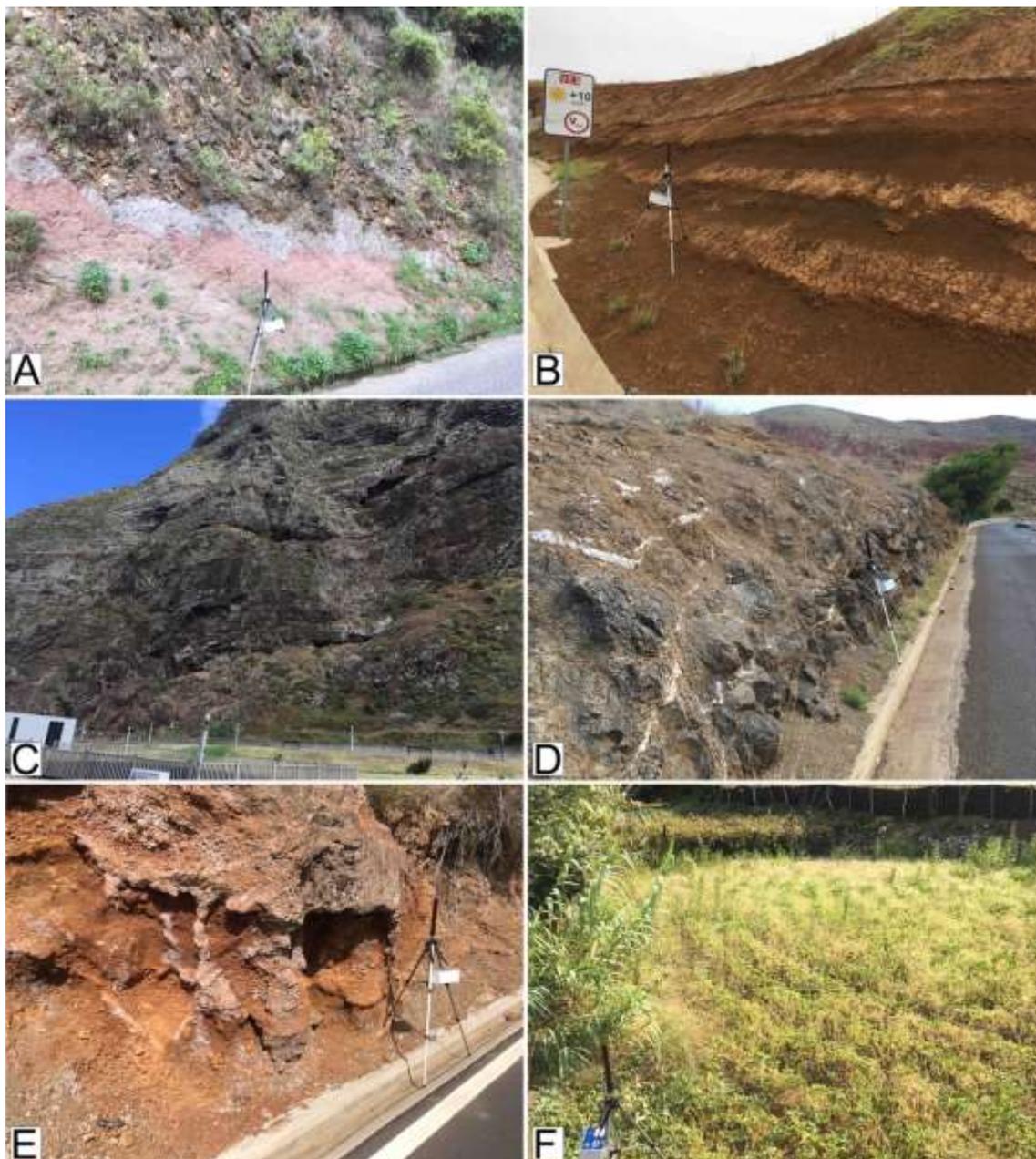


Figura 1 – Fotografias obtidas em afloramentos no decorrer dos trabalhos na Ilha da Madeira, com alguns exemplos dos complexos descritos: A) B1 – Complexo de Base; B) B2 e C) B3 – Complexos Intermédios; D) e F) B6 – Complexo Superior; e F) Material sedimentar de idade quaternária.

No caso da ilha de Porto Santo, e tomando por base o mapa geológico elaborado à escala 1: 80 000 (Figs. 2 e 3), reconhecem-se dois grandes grupos de natureza vulcânica, ou vulcânico-sedimentar, de acordo com o modo de formação e a seguir descritos:

- i) Fase submarina – Bm – Materiais vulcânicos submarinos: piroclastos e escoadas (com intercalações subaéreas, com intercalações de depósitos pararecifais e conglomerados). Idades superiores e a 14,2 Ma.

- ii) Fase subaérea – Ba – Materiais vulcânicos subaéreos: escoadas, domos e filões (basaltos, hawaitos, traquitos e traquiriolitos). Idades entre 14,2 e 8,3 Ma.

Ocorrem ainda inúmeros filões básicos e diferenciados (mugearitos e traquitos; Fig. 3). A cobertura sedimentar quaternária, como já atrás referido, é extensa e composta por depósitos de praia, fluviais, de vertente e paleo-solos silto-argilosos; associam-se ainda crostas calcárias e eolianitos. Nas figuras 4A a 4C, podem observar-se alguns aspetos dos materiais atrás descritos.

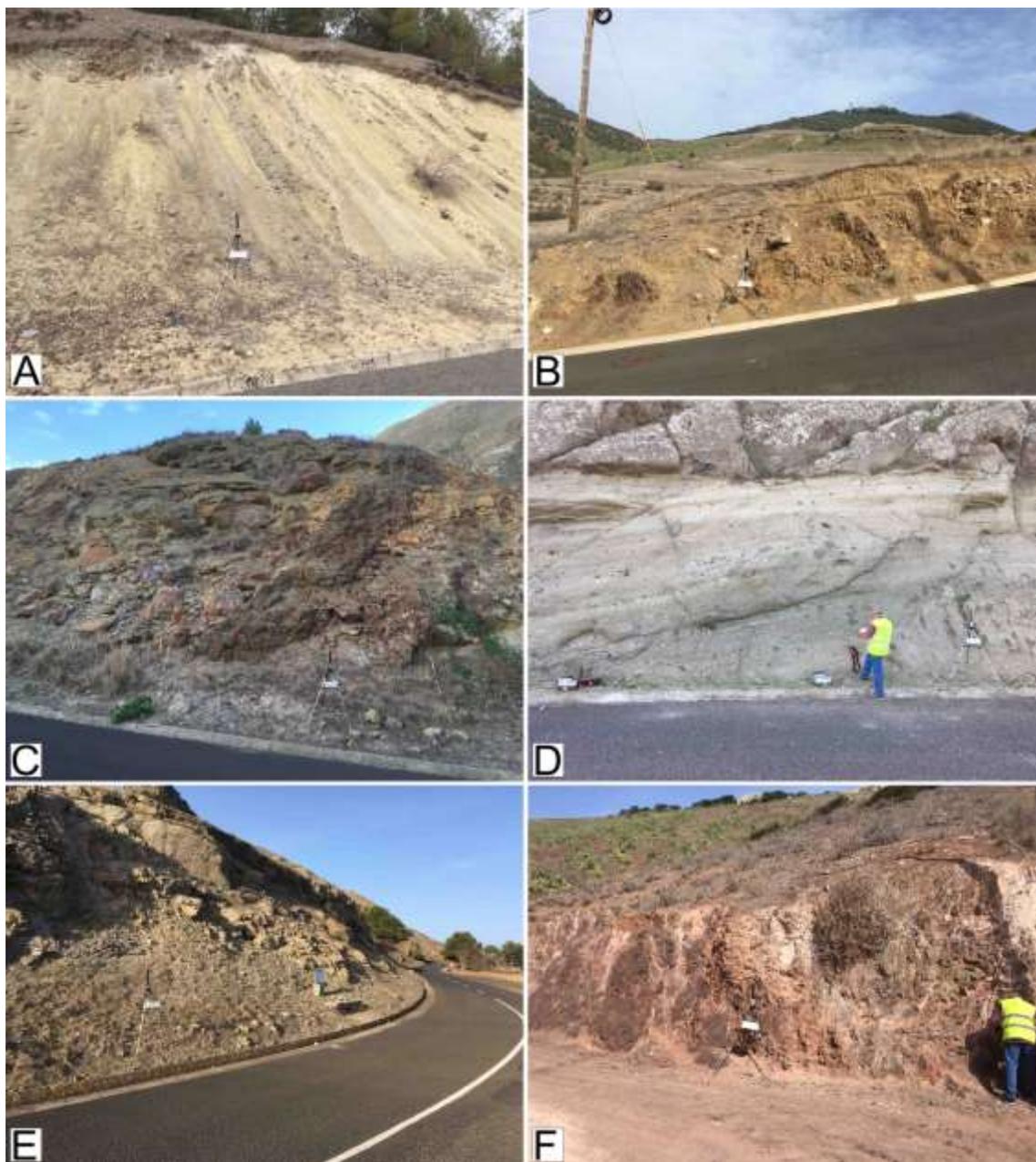


Figura 2 – Fase submarina (Bm) na Ilha de Porto Santo: A) e B) Escoadas de hialoclastitos e depósitos vulcanoclásticos submarinos; C) Depósitos pararecifais e conglomerados; D) Escoadas de hialoclastitos e depósitos vulcanoclásticos submarinos; E) Escoadas vulcanoclásticas de traquiriolitos; e F) Escoadas submarinas de basalto.

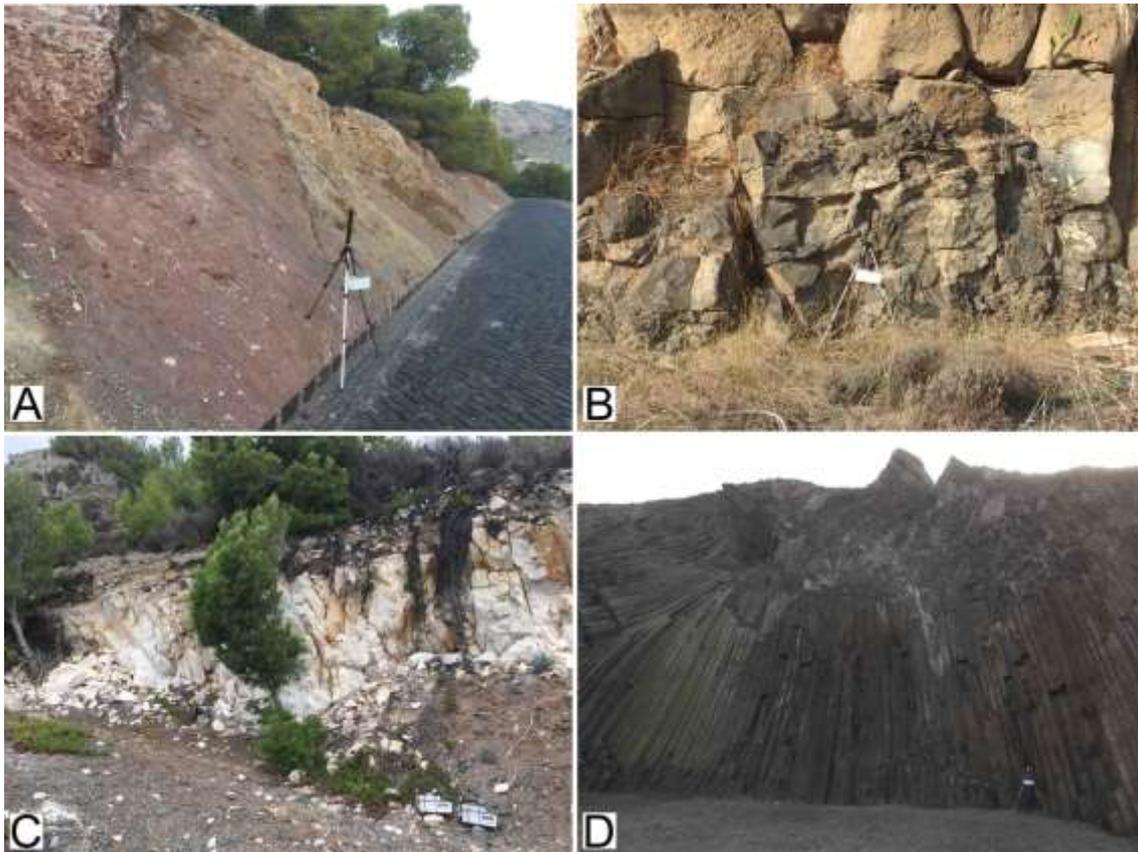


Figura 3 – Fase subaérea (Ba): A) Depósitos vulcanoclásticos subaéreos; B) Escoadas Basálticas. Filões Básicos e diferenciados: C) Escoadas de traquitos; e D) Mugearitos.



Figura 4 – Fotografias obtidas em afloramentos da cobertura quaternária na Ilha de Porto Santo: A) Eolianitos calcareníticos; B) Paleo-solos silto-argilosos; e C) Crostas calcárias.

Tendo em conta o objetivo central do trabalho, e como também já atrás referido, é dado ênfase no presente trabalho à natureza litológica dos materiais. Dada a sua maior variabilidade no caso da Ilha do Porto Santo, expressa na respetiva carta geológica à escala 1: 25 000 (LNEG, 1996), procedeu-se a um agrupamento das unidades geológicas como se ilustra na tabela 1; teve-se ainda em conta no procedimento descrito as unidades geológicas que foram amostradas durante os trabalhos de campo.

Tabela 1 – Agrupamento das unidades geológicas definido, tendo como base a carta geológica 1: 25 000.

Carta 1:25000	Descrição genérica	Carta 1:80000	Grupo
B1			I
B2	Escoadas basálticas submarinas	Bm	I
B3			I
B4			I
h			Escoadas de hawaitos submarinas
dv1	Depósitos vulcanoclásticos submarinos	Bm	II
dv2			II
cb	Escoadas de clastolavas basálticas	Ba	I
bo		Bm_II	I
b1	Escoadas subaéreas de basalto	Ba	I
b2			I
b3			I
dv	Depósitos vulcanoclásticos subaéreos	Ba	II
bt			III
tp	Traquitos em modos de ocorrência diversos	Bm	III
t2			III
t1			III
cg1	Depósitos pararecifais e conglomerados	Bm_I	IV
cg2			IV
cg3			IV
cg4			IV
Ec		Ec	IV
P		Q	IV
Q1-2	Quaternário	Q	IV
Qc		Qc	IV
Q3		Q	IV
Q4		Q	IV

Assim, os materiais de natureza basáltica que ocorrem maioritariamente sob a forma de escoadas integram o grupo I, enquanto os depósitos vulcano-sedimentares compõem o grupo II. Os materiais de natureza mais ácida (intermédios - traquitos), que

ocorrem maioritariamente sob a forma de filões, foram integrados no grupo III, reservando-se o último (grupo IV) para os materiais de natureza sedimentar, intercalados entre unidades vulcânicas (conglomerados ou depósitos pararecifais) ou em cobertura sobre as mesmas, destacando-se neste último caso os eolianitos (Ec) e as crostas calcárias.

As cartas geológicas que suportaram na base os trabalhos de campo, bem como o presente relatório são apresentadas no Anexo A para a ilha da Madeira (A.1) e para a ilha de Porto Santo (A.2).

3. MÉTODOS E TÉCNICAS

Os parâmetros usados na modelação da suscetibilidade ao gás radão foram os seguintes:

- I) Concentração de atividade dos radionuclídeos naturais Ra-226, Th-232 e K-40;
- II) Taxa de dose por exposição à radiação gama (radiação externa);
- III) Concentração de atividade de gás radão no ar interior de edifícios.

Foi ainda efetuada uma revisão bibliográfica, de onde foram extraídos dados de concentrações de urânio em amostras de rocha colhidas em ambas as ilhas (Mata *et al.*, 1998; Geldmacher *et al.*, 2000).

3.1. Determinação de isótopos emissores gama em sólidos

A atividade de radioisótopos emissores gama foi medida em amostras representativas de cada unidade geológica com apoio em espectrómetro de raios-gama portátil (Fig. 5). Cada afloramento foi rastreado e medido o fluxo de radiação gama (em choques por segundo – cps) proveniente dos diferentes materiais rochosos nele presentes. Os valores obtidos conjugadas com as observações geológicas permitiram garantir a representatividade das amostras selecionadas. Em cada local foram colhidas, em média, ca. 2 kg de amostra, devidamente ensacada e codificada para estudos laboratoriais. No LRN-UC, as amostras foram secas e moídas a granulometria inferior a 1 mm, colocadas em contentor apropriado (*beaker* do tipo *Marinelli*) e devidamente selado. A medição foi efetuada após ter sido atingido o equilíbrio isotópico nas séries de decaimento (21 dias) e as concentrações de atividade dos diversos radionuclídeos foram determinadas usando técnicas de espectrometria de raios gama, com suporte no espectrómetro LDM-1 da Ortec (Fig. 6) equipado com detetor HPGe, da série GEM, do tipo P, com 65 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento, correspondente aproximadamente a um volume de 166 cm³, eficiência de 40% - máxima a 200 keV - resolução de 1,5 keV a 122keV e 2,3 keV a 1332,5 keV.



Figura 5 – Técnica de medição da radiometria de superfície com apoio em espectrómetro de raios gama (RS-230) – exemplo retirado da fototeca do LRN-UC.

O tempo de aquisição para cada amostra foi de 36 000 segundos. A atividade de Ra-226 foi obtida através das contagens dos picos dos radioisótopos em equilíbrio Pb-214 (351 keV) e Bi-214 (609 keV), e a Th-232 através do Pb-212 (241 keV) e Ac-209 (911 keV). A atividade do K-40 foi estimada através do pico único com energia de 1460 keV e os resultados expressam-se em Bq/kg.



Figura 6 – Aspectos do espectrómetro gama LDM-1 da Ortec™ – exemplo retirado da fototeca do LRN-UC.

Nas figuras 7 e 8 encontra-se a localização dos pontos de colheita de amostras.

3.2. Determinação da taxa de débito de dose por exposição à radiação gama

A radiação ambiente foi estimada a partir da taxa de débito de dose por exposição à radiação gama com suporte num equipamento equipado com detetor Geiger-Muller (Mini-Instruments™; Fig. 9). As medições foram obtidas com o detetor colocado à altura estandardizada de 1 metro do solo e contabilizadas as contagens obtidas em intervalos de 100 segundos.



Figura 9 – Técnica de medição da radiação ambiente através da taxa de débito de dose por exposição à radiação gama (detetor *Geiger-Muller*).

No total, obtiveram-se 122 resultados de taxa de débito de dose por exposição à radiação gama (Figs. 10 e 11), que correspondem a valores médios de várias medições efetuadas no mesmo afloramento rochoso. Os resultados expressam-se em nGy/h ou em μ Gy/h, e estima-se que o erro médio seja de 20% do valor apurado em cada ponto.

A metodologia aplicada à obtenção no campo dos dados de taxa de dose por exposição à radiação gama não é igual às metodologias adotadas para a obtenção da carta radiométrica de Portugal, utilizada para a construção do mapa de risco de exposição ao radão no território continental. Esta diferença de metodologias não permite a comparação direta de valores absolutos, pelo que se procedeu ao cálculo desta taxa de dose com base nos radionuclídeos naturais, medidos em amostras de rocha.

Para o cálculo da taxa de dose por exposição à radiação gama (TERG) foi utilizada a seguinte equação:

$$TERG_{calc}(nGy/h) = 0,0417 \times K40 + 0,462 \times Ra226 + 0,604 \times Th232 \text{ (Eq. 1)}$$

Os fatores de conversão 0.0417, 0.462 e 0.604 (em Bq/kg) foram retirados de UNSCEAR (2010).

Para validação do procedimento foi avaliada a correspondência entre ambas as metodologias através duma regressão linear entre a taxa de dose observada no campo e a calculada. Os resultados expressam-se na figura 12. É possível afirmar que os parâmetros estimados para a reta de regressão são significativos e que a correlação entre ambas as variáveis é boa ($R^2 = 0,68$).

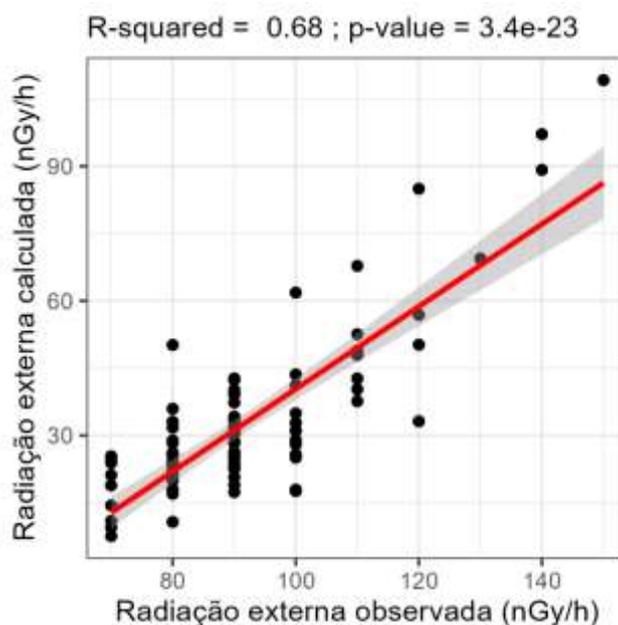


Figura 12 – Relação entre os valores da taxa de débito de dose por exposição à radiação gama, medida pelo método direto e por cálculo a partir da concentração de atividade dos radionuclídeos medidos nas rochas.

3.3. Determinação da concentração do gás radão no ar interior

A determinação da atividade do radão no interior das instalações integradas no presente estudo foi realizada com recurso a detetores passivos do tipo CR-39, em suporte apropriado e fechado, assegurando assim proteção contra poeiras, humidade e manuseamento indevido, os quais foram dispersos, geralmente um por instalação dada a dimensão reduzida das mesmas, tendo sido distribuídos um total de 51 unidades. A colocação dos detetores e a respetiva recolha foi da responsabilidade da Direção Regional do Ambiente e das Alterações Climáticas.

Os detetores estiveram expostos por período de ca. 3 meses, tendo a sua colocação sido efetuada em janeiro de 2024 e recolha em abril de 2024.

Após a recolha, os detetores foram processados no LRN através de tratamento químico e posterior contagem da densidade de impactos registados, com recurso a sistema automático de análise de imagem Radosys™ (Fig. 13). Esta densidade, função do tempo de exposição individual e de fatores de calibração apropriados, foi subsequentemente convertida em concentração do gás radão.



Figura 13 – Aspectos do processamento dos detetores passivos do tipo CR-39 – exemplo retirado da fototeca do LRN-UC.

Nas figuras 14 e 15 encontra-se a localização das medições de radão no ar (presente contrato e uma campanha resultante de uma parceria entre a DRAAC-AIEA).

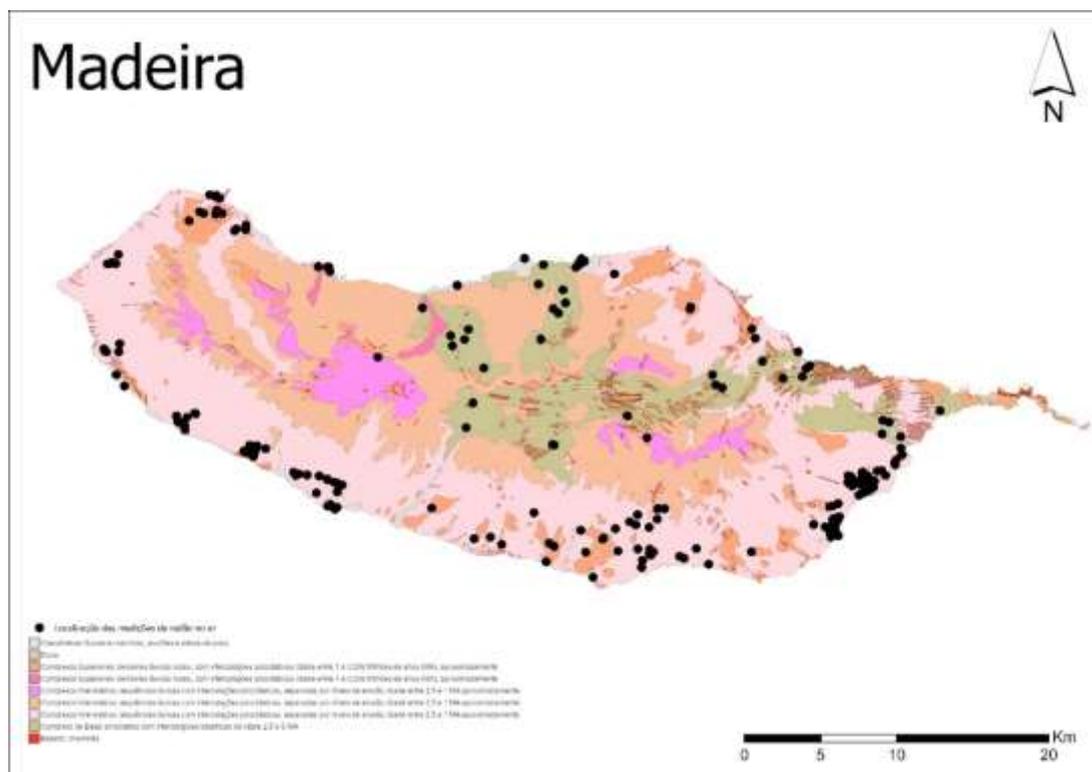


Figura 14 – Localização das medições de radão no ar interior de edifícios, através de detetores passivos, na Ilha da Madeira. Cartografia geológica à escala 1:80 000 (LNEG, 2009).

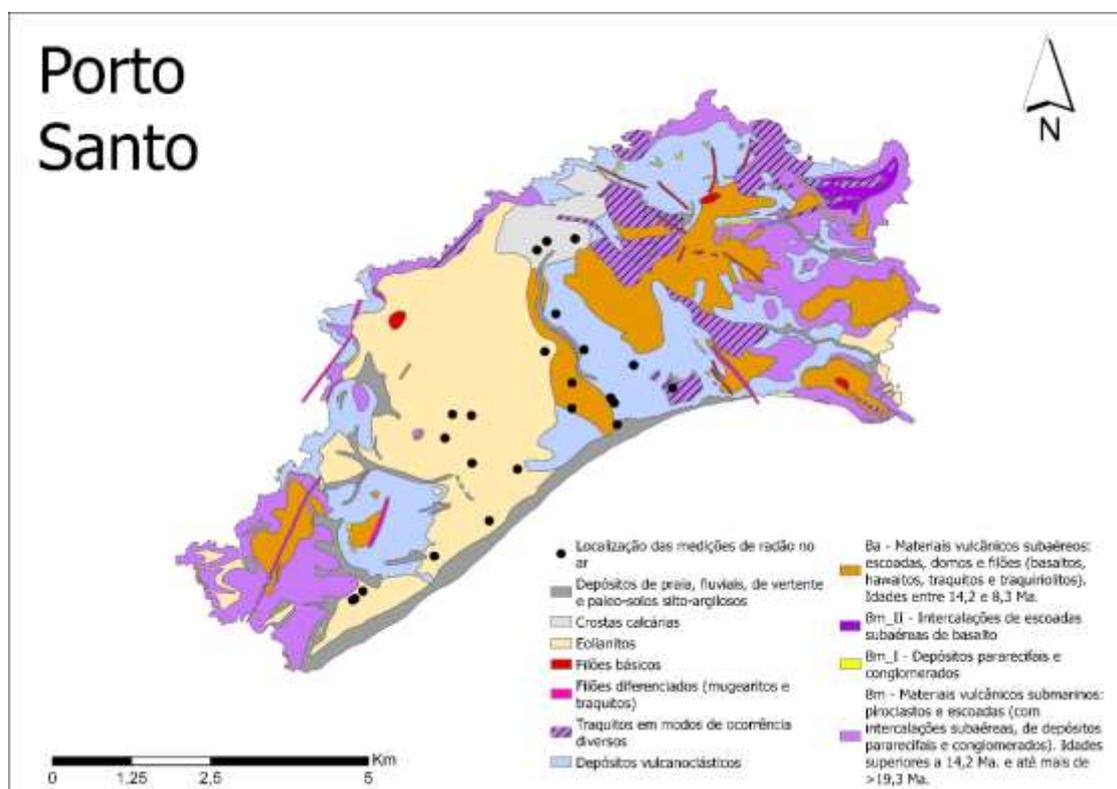


Figura 15 – Localização das medições de radão no ar interior de edifícios, através de detetores passivos, na Ilha de Porto Santo. Cartografia geológica adaptada de LNEG (2009) à escala 1:80 000.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Globais

Nos histogramas das figuras 16, 17 e 18 sintetizam-se os resultados globais obtidos para os diversos parâmetros. No geral, os valores apurados são baixos e refletem naturalmente as litologias dominantes nas ilhas em que é dominante o termo básico. Quando em presença das mais raras ocorrências de termos intermédios, como traquitos e traquiandesitos, os valores de emissão de radiação gama de superfície e as concentrações de atividade dos radioisótopos em rocha são um pouco mais elevados, em particular em algumas unidades aflorantes na Ilha do Porto Santo. Os dados de urânio em amostras de rocha, reunidos da literatura, apresentam valores baixos e reforçam os dados obtidos nos trabalhos de campo. No que respeita à concentração de atividade do gás radão no ar interior (Fig. 17) dominam claramente as classes de valores baixos, em geral inferiores a 50 Bq/m³.

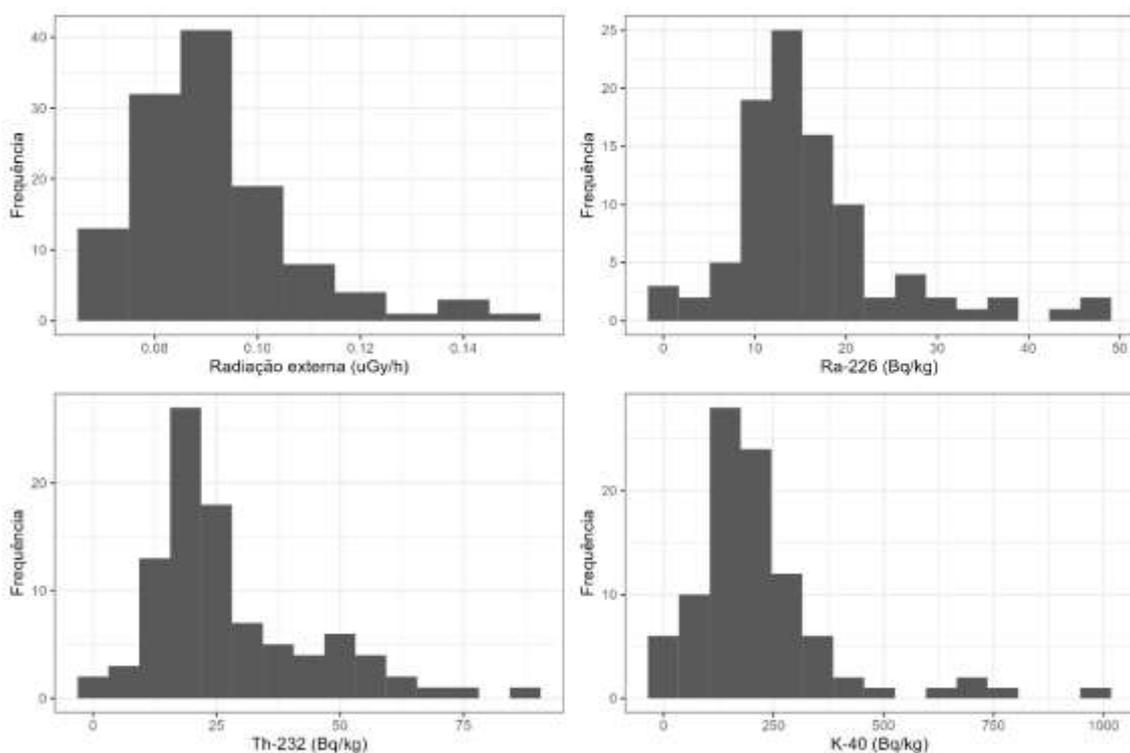


Figura 16 – Histogramas globais das variáveis de radiação externa (uGy/h), Ra-226, Th-232 e K-40 (Bq/m³).

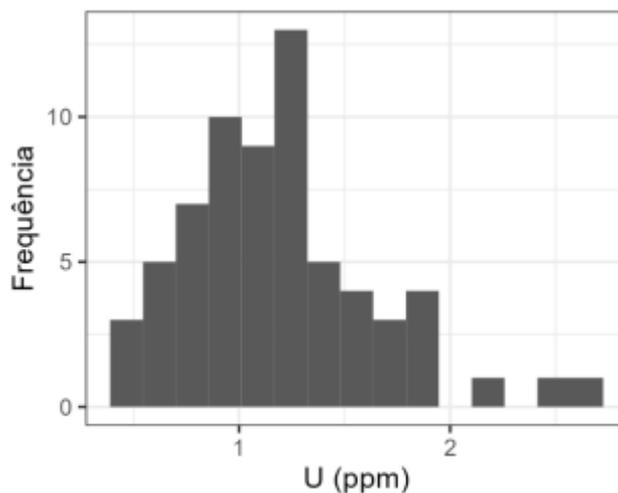


Figura 17 – Histograma das concentrações urânio em amostras de rocha.

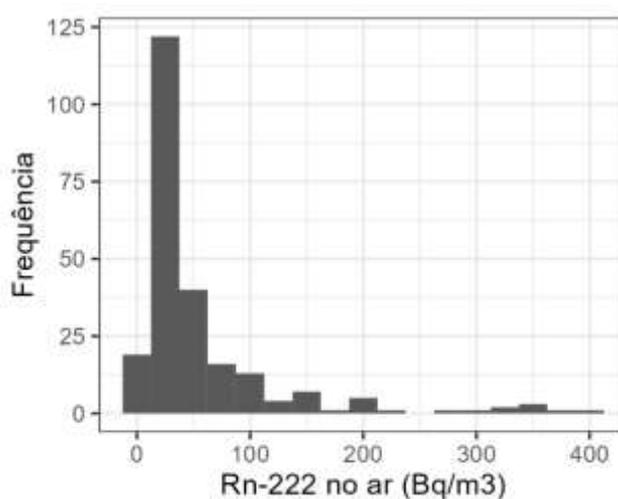


Figura 18 – Histograma das concentrações de atividade de Rn-222 no ar interior de edifícios.

4.2. Por ilha

4.2.1. TAXA DE DOSE POR EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO GAMA – MEDIÇÃO DIRETA

Na tabela 2, sintetizam-se os resultados obtidos para as principais ilhas do arquipélago. Em ambos os casos, os valores médios são baixos e as distribuições afastam-se da normalidade. O valor máximo é registado em Porto Santo (0,15 uGy/h), e nesta ilha a distribuição tem maior assimetria positiva, que se reflete na tendência para a ocorrência de classes de valor mais elevado.

Tabela 2 – Estatística descritiva básica dos dados de radiação externa (uGy/h), para a Ilha da Madeira e de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	Madeira	Porto Santo
Contagem	67	55
Média	0,09	0,10
Desvio Padrão	0,01	0,02
Mínimo	0,07	0,07
1º quartil	0,08	0,09
Mediana	0,09	0,09
3º quartil	0,09	0,11
Máximo	0,11	0,15
Curtose	2,43	3,46
Assimetria	0,09	0,95
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,898	W = 0,902
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value < 0,01	p-value < 0,01
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 18,072$	
H ₀ : Os dois grupos provêm da mesma população	p-value < 0,01	

Comparativamente aos dados disponíveis para Portugal continental os obtidos nas ilhas incluem-se nas classes de valores mais baixos e registados em rochas de natureza similar (básicas e ultrabásicas).

4.2.2. CONCENTRAÇÕES DE ATIVIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS NATURAIS RA-226, TH-232 E K-40

As concentrações dos radioisótopos em apreço foram determinadas em amostras de rocha representativas da variabilidade litológica aflorante nas ilhas da Madeira e do Porto Santo e que se sintetizam nas tabelas 3, 4 e 5, bem como nos diagramas da figura 19.

As duas ilhas apresentam tipologia de distribuição, medianas e dispersões de valores similares. No que respeita às concentrações de Ra-226, estatisticamente as duas populações não se diferenciam, por oposição às distribuições de Th-232 e K-40 que estatisticamente mostram tendência contrária. Nestas duas últimas distribuições, a assimetria positiva das mesmas evidencia uma extensão da cauda direita da distribuição e que se deverá á maior variabilidade geoquímica nas rochas do Porto Santo (Fig. 19). Os valores mais elevados, bem como os valores máximos, tendem a ocorrer nesta ilha (88 e 984 Bq/kg, para Th-232 e K-40, respetivamente).

Tal como já indicado para o caso da radiação externa, e tal como expectável, os valores apurados no presente estudo para as concentrações de atividade dos isótopos naturais são também na generalidade dos casos baixos e na linha dos obtidos em trabalhos similares no continente em rochas da mesma afinidade geoquímica (baixa a intermédia).

Tabela 3 – Estatística descritiva básica dos dados de concentração de Ra-226 (Bq/kg) em amostras de rochas, para a Ilha da Madeira e de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	Madeira	Porto Santo
Contagem	54	40
Média	14,5	18,1
Desvio Padrão	8,5	9,4
Mínimo	0,0	7,9
1º quartil	10,1	11,1
Mediana	13,0	15,0
3º quartil	17,0	19,9
Máximo	47,4	46,9
Curtose	6,55	4,56
Assimetria	1,36	1,51
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,897	W = 0,814
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value < 0,01	p-value < 0,01
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 2,754$	
H ₀ : Os dois grupos provêm da mesma população	p-value = 0,09	

Tabela 4 – Estatística descritiva básica dos dados de concentração de Th-232 (Bq/kg) em amostras de rochas, para a Ilha da Madeira e de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	Madeira	Porto Santo
Contagem	54	40
Média	25,0	32,1
Desvio Padrão	13,5	19,1
Mínimo	0,5	3,1
1º quartil	15,7	20,6
Mediana	21,1	25,3
3º quartil	30,3	46,3
Máximo	62,0	88,0
Curtose	3,37	3,63
Assimetria	0,98	1,09
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,911	W = 0,892
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value < 0,01	p-value < 0,01
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 3,893$	
H ₀ : Os dois grupos provêm da mesma população	p-value = 0,05	

Tabela 5 – Estatística descritiva básica dos dados de concentração de K-40 (Bq/kg) em amostras de rochas, para a Ilha da Madeira e de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	Madeira	Porto Santo
Contagem	54	40
Média	151	305
Desvio Padrão	82	202
Mínimo	3	21
1º quartil	93	178
Mediana	151	255
3º quartil	203	352
Máximo	350	984
Curtose	2,58	5,37
Assimetria	0,12	1,61
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,985	W = 0,835
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value = 0,724	p-value < 0,01
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 22,552$	
H ₀ : Os dois grupos provêm da mesma população	p-value < 0,01	

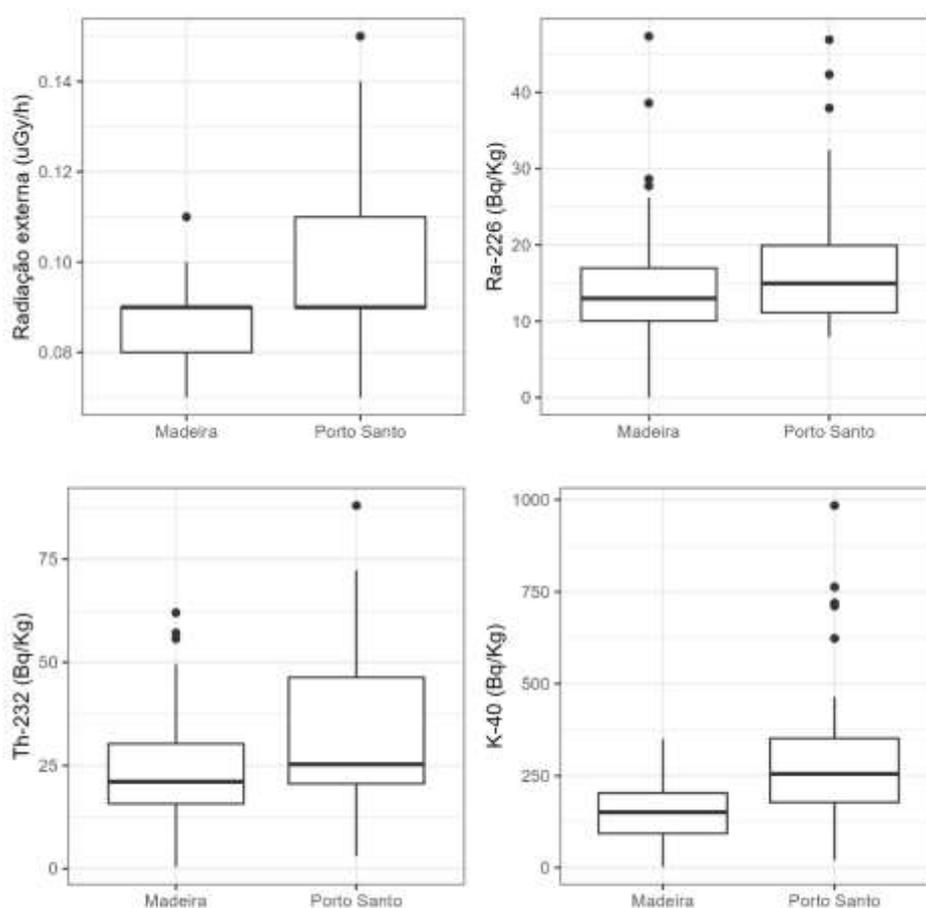


Figura 19 – Diagramas de caixas em função da ilha da Madeira e da ilha de Porto Santo, para as variáveis: radiação externa (uGy/h) e concentração de rádio-226 (Bq/kg), tório-232 (Bq/kg) e potássio (Bq/kg) em amostras de rocha.

4.2.3. TAXA DE DOSE POR EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO GAMA – CALCULADA

A taxa de dose por exposição à radiação gama calculada a partir das concentrações dos radionuclídeos naturais apresenta o mesmo padrão que a taxa de dose medida nos trabalhos de campo (Fig. 20). Os valores médios são baixos e as distribuições afastam-se da normalidade, com os valores mais elevados a ocorrerem na ilha de Porto Santo (109,2 nGy/h; Tabela 6). Em termos absolutos, a taxa de dose calculada apresenta valores mais reduzidos do que a medida no campo. Efeito este que é expectável dada a diferença implícita na metodologia de medição.

Tabela 6 – Estatística descritiva básica dos dados de radiação externa calculada (nGy/h) a partir das concentrações dos radionuclídeos naturais, para a Ilha da Madeira e de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	Madeira	Porto Santo
Contagem	54	40
Média	28,1	40,4
Desvio Padrão	10,7	22,8
Mínimo	9,5	7,6
1º quartil	21,3	28,2
Mediana	25,4	32,6
3º quartil	32,6	48,2
Máximo	61,8	109,2
Curtose	4,07	4,50
Assimetria	1,07	1,41
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,918	W = 0,850
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value < 0,01	p-value < 0,01
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 11,373$	
H ₀ : Os dois grupos provêm da mesma população	p-value < 0,01	

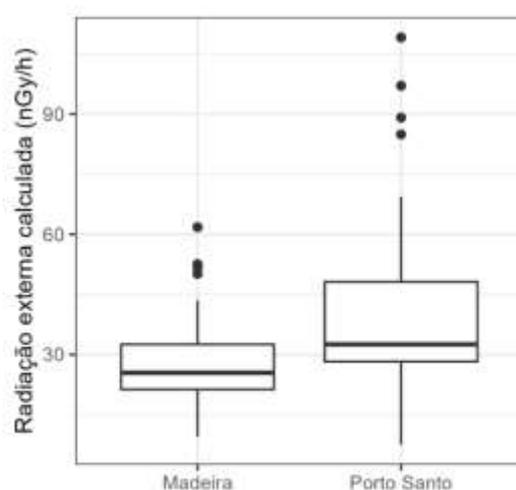


Figura 20 – Representação dos valores estatísticos estimados para a distribuição da taxa de débito de dose por exposição à radiação gama.

4.2.4. CONCENTRAÇÃO DE URÂNIO EM AMOSTRAS DE ROCHA

Os dados reunidos da literatura de urânio em amostras de rocha confirmam a tendência de valores baixos associados à cadeia de decaimento do urânio, nas ilhas da Madeira e de Porto Santo (Tabela 7). Neste caso, por oposição ao que acontece com Ra-226, as duas distribuições devem ser consideradas estatisticamente diferenciadas, sendo que a ilha de Porto Santo apresenta novamente concentrações ligeiramente superiores (Tabela 7; Fig. 21).

Tabela 7 – Estatística descritiva básica dos dados de concentração de Urânio (ppm) em amostras de rochas, para a Ilha da Madeira e de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	Madeira	Porto Santo
Contagem	55	11
Média	1,1	1,4
Desvio Padrão	0,4	0,5
Mínimo	0,5	0,4
1º quartil	0,9	1,2
Mediana	1,1	1,4
3º quartil	1,3	1,6
Máximo	2,6	2,2
Curtose	4,87	3,14
Assimetria	1,20	-0,28
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,915	W = 0,975
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value < 0,01	p-value = 0,928
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 3,885$	
H ₀ : Os dois grupos provêm da mesma população	p-value = 0,05	

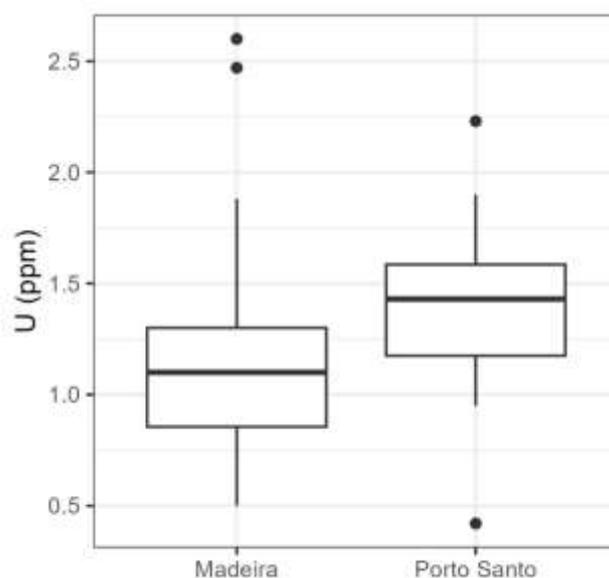


Figura 21 – Diagramas de caixas das concentrações de Urânio em amostras de rocha em função das diferentes ilhas.

4.2.5. CONCENTRAÇÕES DE ATIVIDADE DO GÁS RADÃO NO AR INTERIOR

Os valores obtidos estão na linha dos resultados obtidos para os parâmetros geogénicos, ou seja, baixos a muito baixos (Tabela 8 e Fig. 22). A média em ambas as ilhas é inferior a 60 Bq/m³ e com mediana ainda menor que este valor. Os parâmetros aferidores da tendência central das distribuições são ligeiramente mais elevados na Ilha da Madeira, onde apenas em 3% dos casos foram registadas concentrações superiores a 300 Bq/m³ (máximo de 396 Bq/m³). Estatisticamente as populações de dados das duas ilhas, de acordo com os resultados da aplicação do teste de Kruskal-Wallis, devem ser consideradas significativamente distintas e, pelo atrás afirmado, com tendência a valores um pouco mais elevados na Madeira. Este padrão revela-se de certo modo inesperado face às indicações dadas pelas variáveis geogénicas (capítulo A.I e A.II). Nas ilhas Selvagens e Desertas apenas foi colocado um detetor passivo de Rn-222 pelo que a avaliação estatística não é possível.

Tabela 8 – Estatística descritiva básica dos dados de concentrações de Rn-222 no ar interior de edifícios (Bq/m³) para as diferentes ilhas, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis. Abreviaturas: NA - Não aplicável.

	Deserta	Madeira	Porto Santo	Selvagens
Contagem	1	210	25	1
Média	9	60	32	23
Desvio Padrão	NA	73	28	NA
Mínimo	9	2	0	23
1º Quartil	9	20	16	23
Mediana	9	34	25	23
3º Quartil	9	64	40	23
Máximo	9	396	145	23
Curtose	NA	10,39	12,33	NA
Assimetria	NA	2,69	2,79	NA
P(Rn-222 ar >= 300)	0%	3%	0%	0%
P(Rn-222 ar >= 100)	0%	15%	4%	0%
Teste de Shapiro-Wilk		W = 0,642	W = 0,710	
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	NA	p-value < 0,01	p-value < 0,01	NA
Teste de Kruskal-Wallis		$\chi^2 = 3,870$		
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população	NA	p-value = 0,05		NA

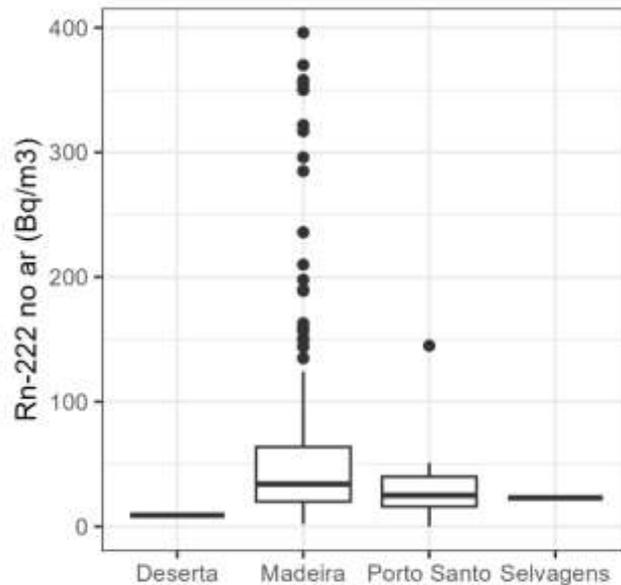


Figura 22 - Diagramas de caixas das concentrações de Rn-222 no ar interior de edifícios em função das diferentes ilhas.

4.3. Dados por ilha e por unidade geológica

4.3.1. ILHA DA MADEIRA

Foram consideradas as principais unidades litológicas definidas na cartografia oficial da ilha, à escala 1: 50 000. Tratam-se essencialmente de rochas basálticas associadas a focos emissores ativos durante o tempo de construção da ilha (índices 1 a 6, em que o primeiro é o mais antigo).

4.3.1.1. TAXA DE DOSE POR EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO GAMA – MEDIÇÃO DIRETA

Os resultados obtidos expressam-se na tabela 9 e na figura 23, com valores baixos em todos os casos e estatisticamente coerentes entre si, ou seja, do ponto de vista da

emissão de radiação gama não é possível individualizar qualquer uma das unidades geológicas.

Tabela 9 – Estatística descritiva básica dos dados de radiação externa (uGy/h) para as unidades litológicas da Ilha da Madeira, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis. Abreviaturas: NA - Não aplicável.

	b1	b2	b3	b4	b5	b6	d	q
Contagem	15	24	7	5	3	11	1	1
Média	0,09	0,08	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NA	NA
Mínimo	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,09
1º quartil	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09
Mediana	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09
3º quartil	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,09
Máximo	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,08	0,09
Curtose	2,62	2,07	1,86	1,25	1,50	1,77	NA	NA
Assimetria	0,37	-0,40	-0,19	0,00	0,71	0,13	NA	NA
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,926	W = 0,822	W = 0,922	W = 0,821	W = 0,750	W = 0,889		
H0: A população apresenta uma distribuição normal	p-value = 0,24	p-value < 0,01	p-value = 0,48	p-value = 0,12	p-value < 0,01	p-value = 0,14	NA	NA
Teste de Kruskal-Wallis								
H0: Os grupos provêm da mesma população			$\chi^2 = 2,219$ p-value = 0,82				NA	NA

4.3.1.2. CONCENTRAÇÕES DE ATIVIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS NATURAIS RA-226, TH-232 E K-40

Situação similar é observada para o caso do Th-232, que não é estatisticamente diferenciável (Tabela 10), por oposição às concentrações de Ra-226 e K-40, cujas distribuições são estatisticamente diferenciáveis (Tabelas 11 e 12). Não obstante, os valores são tendencialmente baixos e apresentam variabilidade reduzida. Para as variáveis Ra-226 e K-40, a unidade B4 tem valores estatisticamente mais baixos que as restantes, enquanto as unidades mais antigas têm concentrações de atividade de K-40 mais elevadas (Fig. 23).

Tabela 10 – Estatística descritiva básica dos dados de Ra-226 (Bq/kg) para as unidades litológicas da Ilha da Madeira, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	b1	b2	b3	b4	b5	b6
Contagem	16	15	6	5	3	9
Média	14,4	20,4	12,4	9,9	16,9	8,1
Desvio Padrão	6,4	10,8	4,5	6,2	4,6	5,8
Mínimo	0,5	8,0	5,7	0,2	12,2	0,0
1º quartil	11,6	13,2	9,6	9,4	14,6	4,8
Mediana	13,1	16,0	13,0	9,9	17,0	6,9
3º quartil	16,0	22,8	15,7	13,0	19,2	12,5
Máximo	27,7	47,4	17,5	16,8	21,4	18,4
Curtose	3,83	3,90	1,78	2,42	1,50	2,20
Assimetria	0,33	1,30	-0,34	-0,64	-0,07	0,28
Teste de Shapiro-Wilk	W =	W =	W =	W =	W =	W =
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	0,911	0,857	0,958	0,935	0,999	0,976
	p-value = 0,12	p-value = 0,02	p-value = 0,80	p-value = 0,63	p-value = 0,94	p-value = 0,94
Teste de Kruskal-Wallis						
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população						

Tabela 11 – Estatística descritiva básica dos dados de Th-232 (Bq/kg) para as unidades litológicas da Ilha da Madeira, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	b1	b2	b3	b4	b5	b6
Contagem	16	15	6	5	3	9
Média	26,1	27,8	17,1	23,6	23,5	24,7
Desvio Padrão	14,5	16,7	3,6	6,6	17,7	12,4
Mínimo	7,6	0,5	12,7	13,6	12,8	6,7
1º quartil	16,5	16,2	14,4	21,2	13,3	17,1
Mediana	19,7	24,4	17,2	24,8	13,7	25,1
3º quartil	31,6	37,8	19,3	27,3	28,8	29,4
Máximo	55,7	62,0	22,1	30,9	43,9	48,4
Curtose	2,43	2,79	1,67	2,14	1,50	2,66
Assimetria	0,90	0,61	0,11	-0,54	0,71	0,49
Teste de Shapiro-Wilk	W =	W =	W =	W =	W =	W =
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	0,843	0,946	0,962	0,966	0,771	0,973
	p-value = 0,01	p-value = 0,46	p-value = 0,84	p-value = 0,85	p-value = 0,05	p-value = 0,92
Teste de Kruskal-Wallis						
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população						

Tabela 12 – Estatística descritiva básica dos dados de K-40 (Bq/kg) para as unidades litológicas da Ilha da Madeira, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk, Barklett e ANOVA.

	b1	b2	b3	b4	b5	b6
Contagem	16	15	6	5	3	9
Média	197	144	171	87	121	112
Desvio Padrão	78	86	45	58	72	80
Mínimo	55	3	121	10	38	7
1º quartil	151	74	142	43	98	77
Mediana	187	141	164	116	159	89
3º quartil	240	216	189	117	163	169
Máximo	350	288	245	148	166	237
Curtose	2,58	1,99	2,30	1,53	1,50	1,88
Assimetria	0,21	0,04	0,62	-0,37	-0,70	0,21
Teste de Shapiro-Wilk	W =	W =	W =	W =	W =	W =
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	0,984	0,967	0,956	0,904	0,791	0,948
	p-value = 0,99	p-value = 0,81	p-value = 0,79	p-value = 0,43	p-value = 0,09	p-value = 0,0,67
Teste de Barklett						K ² = 2,832
H ₀ : As variâncias das distribuições são iguais						p-value = 0,73
ANOVA						F = 2,575
H ₀ : As médias das distribuições são iguais						p-value = 0,04

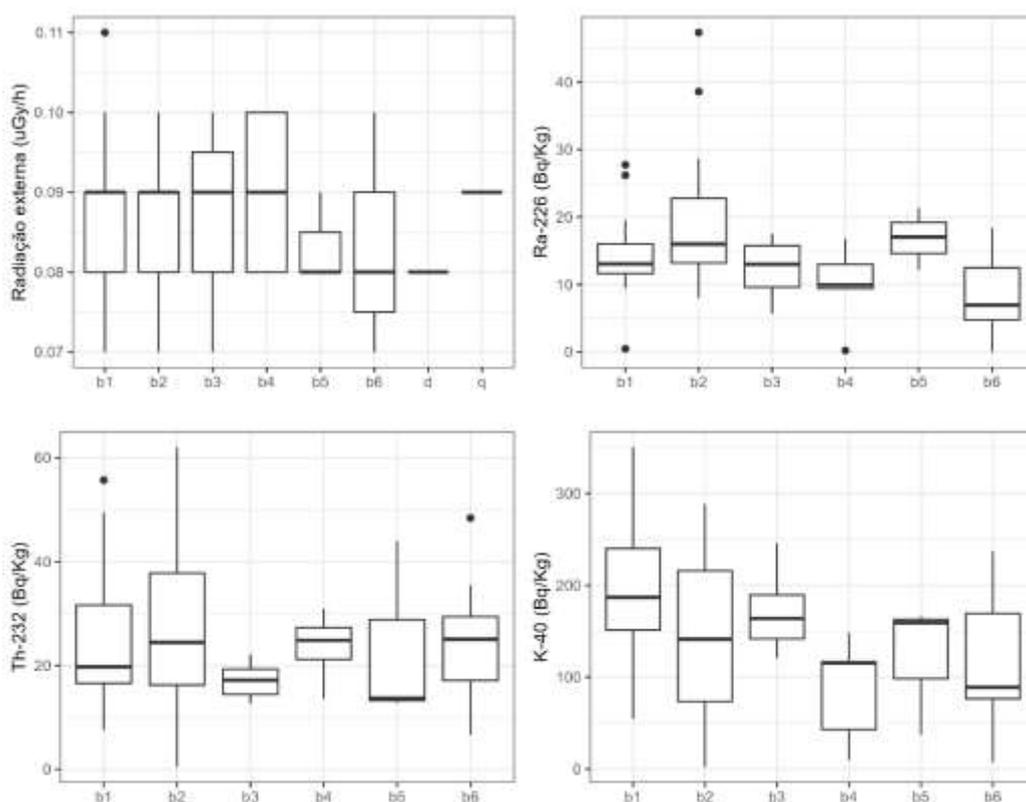


Figura 23 – Diagramas de caixas em função das unidades litológicas na Ilha da Madeira, para as variáveis: radiação externa (uGy/h) e concentração de Ra-226 (Bq/kg), Th-232 (Bq/kg) e K-40 (Bq/kg) em amostras de rocha.

4.3.1.3. TAXA DE DOSE POR EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO GAMA - CALCULADA

Os resultados obtidos expressam-se na tabela 13 e na figura 24, com valores baixos em todos os casos, à semelhança da taxa de dose observada, do ponto de vista da emissão de radiação gama calculada não é possível individualizar qualquer uma das unidades geológicas.

Tabela 13 – Estatística descritiva básica dos dados de taxa de dose por exposição à radiação gama (nGy/h), calculada a partir dos radionuclídeos naturais, para as unidades litológicas da Ilha da Madeira, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	b1	b2	b3	b4	b5	b6
Contagem	16	15	6	5	3	9
Média	30,6	32,2	23,2	22,4	27,0	23,4
Desvio Padrão	12,5	11,5	4,8	4,4	8,1	8,8
Mínimo	9,5	18,0	17,6	17,4	20,0	11,0
1º quartil	23,4	23,6	20,5	17,8	22,5	18,0
Mediana	25,9	30,3	22,3	25,1	25,1	23,0
3º quartil	36,5	39,7	25,1	25,8	30,5	30,7
Máximo	52,5	61,8	31,1	26,0	36,0	37,3
Curtose	2,39	3,86	2,33	1,18	1,50	1,87
Assimetria	0,59	1,07	0,60	-0,39	0,41	0,21
Teste de Shapiro-Wilk	W =	W =	W =	W =	W =	W =
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	0,879	0,904	0,949	0,754	0,957	0,966
	p-value = 0,04	p-value = 0,11	p-value = 0,74	p-value = 0,03	p-value = 0,603	p-value = 0,86
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 7,769$					
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população	p-value = 0,17					

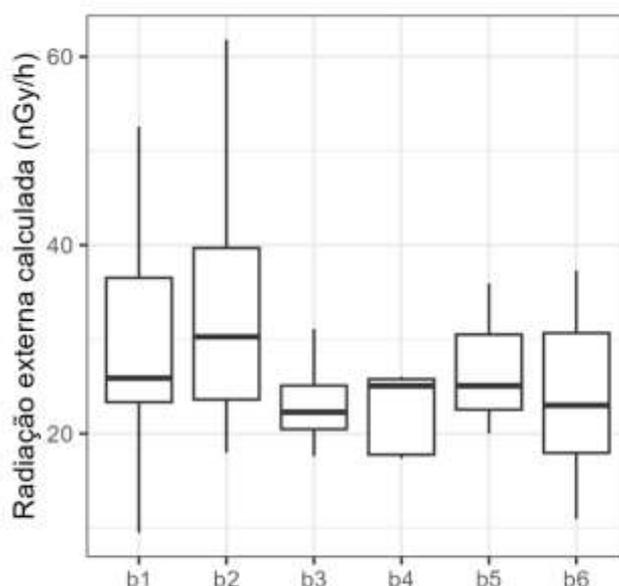


Figura 24 – Diagrama de caixas em função das unidades litológicas na Ilha da Madeira para a variável radiação externa (nGy/h) calculada.

4.3.1.4. CONCENTRAÇÕES DE ATIVIDADE DO GÁS RADÃO NO AR INTERIOR

Os parâmetros estatísticos básicos das concentrações de Rn-222 no ar interior de edifícios por litologia na ilha da Madeira encontram-se na tabela 14. A maioria das distribuições não são normais, com exceção da unidade b5, para a qual não se rejeita essa hipótese. O resultado do teste de Kruskal-Wallis não é significativo pelo que não permite rejeitar a hipótese de que todas as distribuições podem pertencer a uma mesma população. A aparente ocorrência de valores um pouco mais elevados, como é observado por exemplo na unidade b2, pode então ser explicada simplesmente pelo maior número de dados disponíveis. Os intervalos de variação são praticamente constantes para todas as unidades, bem como as suas medianas (Fig. 25). A unidade b3 é uma exceção, que pode ser justificada pelo reduzido volume de dados disponível para esta unidade.

Tabela 14 – Estatística descritiva básica dos dados de concentrações de Rn-222 no ar interior de edifícios (Bq/m³) por litologia na Ilha da Madeira, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis. Abreviaturas: NA - Não aplicável.

	q	b1	b2	b3	b4	b5	b6	f
Contagem	27	32	127	2	1	4	16	1
Média	51	53	63	110	47	38	68	22
Desvio padrão	70	79	75	49	NA	31	73	NA
Mínimo	7	2	3	75	47	14	8	22
1º quartil	20	19	21	92	47	15	21	22
Mediana	30	28	36	110	47	29	43	22
3º quartil	51	43	70	127	47	52	97	22
Máximo	370	354	396	144	47	81	285	22
P(Rn-222 ar >= 300)	0,04	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Teste de Shapiro-Wilk	W =	W =	W =			W =	W =	
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	0,500	0,516	0,673	-	-	0,860	0,765	-
	p-value <	p-value <	p-value <			p-value =	p-value <	
	0,01	0,01	0,01			0,26	0,01	
Teste de Kruskal-Wallis								
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população				$\chi^2 = 2,212$				
				p-value = 0,697				

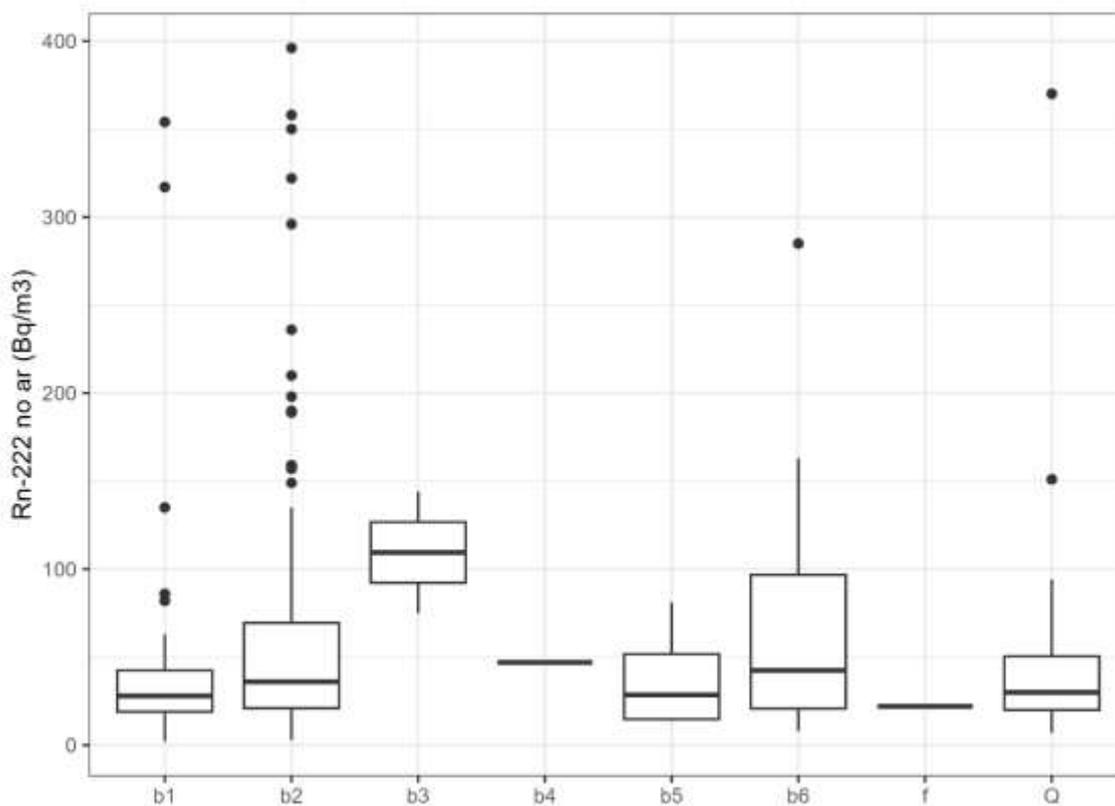


Figura 25 – Diagrama de caixas em função das unidades litológicas na Ilha da Madeira para a concentração do gás radão no ar interior de habitações.

4.3.2. ILHA DO PORTO SANTO

4.3.2.1. TAXA DE DOSE POR EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO GAMA – MEDIÇÃO DIRETA

Considerando o agrupamento litológico de Porto Santo, as distribuições de taxa de dose por exposição à radiação gama são significativamente distintas (Tabela 15). O grupo de composição intermédia a ácida (III) apresenta média um pouco superior à das restantes unidades (0,13 uGy/h; Tabela 15), tal como também é visível na figura 26.

Tabela 15 – Estatística descritiva básica dos dados de radiação externa (uGy/h), de acordo com os grupos considerados para a Ilha de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	I	II	III	IV
Contagem	20	16	7	12
Média	0,09	0,10	0,13	0,09
Desvio Padrão	0,02	0,01	0,02	0,01
Mínimo	0,07	0,08	0,09	0,07
1º quartil	0,08	0,09	0,12	0,08
Mediana	0,09	0,10	0,14	0,09
3º quartil	0,11	0,10	0,14	0,10
Máximo	0,12	0,11	0,15	0,12
Curtose	1,82	2,19	2,52	3,27
Assimetria	0,42	0,20	-0,94	0,60
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,880	W = 0,870	W = 0,854	W = 0,928
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value = 0,02	p-value = 0,03	p-value = 0,13	p-value = 0,36
Teste de Kruskal-Wallis				
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população				

4.3.2.2. CONCENTRAÇÕES DE ATIVIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS NATURAIS RA-226, TH-232 E K-40

Para as variáveis dos radionuclídeos naturais, estatisticamente os diferentes grupos considerados são distinguíveis (Tabelas 16 a 18). Em particular, o grupo de composição mais ácida (III) destaca-se dos demais por valores mais elevados de concentração de atividade de todos os radionuclídeos em apreço (Fig. 16). Nos restantes grupos o padrão é similar e as diferenças entre grupos são pouco significativas.

Tabela 16 – Estatística descritiva básica dos dados de Ra-226 (Bq/kg), de acordo com os grupos considerados para a ilha de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	I	II	III	IV
Contagem	17	11	7	5
Média	15,1	14,4	31,4	17,5
Desvio Padrão	5,5	3,7	9,2	14,1
Mínimo	9,6	10,2	18,5	7,9
1º quartil	10,4	11,0	26,3	10,6
Mediana	14,1	14,3	31,4	12,1
3º quartil	16,7	17,5	35,2	14,9
Máximo	31,9	19,8	46,9	42,3
Curtose	6,12	1,56	2,41	3,10
Assimetria	1,67	0,27	0,33	1,38
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,824	W = 0,894	W = 0,983	W = 0,720
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value < 0,01	p-value = 0,15	p-value = 0,97	p-value = 0,02
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 12,890$			
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população	p-value < 0,01			

Tabela 17 – Estatística descritiva básica dos dados de Th-232 (Bq/kg), de acordo com os grupos considerados para a ilha de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	I	II	III	IV
Contagem	17,0	11,0	7,0	5,0
Média	26,0	28,5	57,9	24,4
Desvio Padrão	11,3	11,0	21,7	24,8
Mínimo	12,5	17,3	21,0	3,1
1º quartil	20,2	20,5	47,7	6,6
Mediana	24,1	24,3	58,9	21,1
3º quartil	28,3	35,5	70,9	26,1
Máximo	54,0	47,4	88,0	65,3
Curtose	3,91	2,03	2,43	2,56
Assimetria	1,19	0,76	-0,36	0,97
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,880	W = 0,850	W = 0,970	W = 0,863
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value = 0,03	p-value = 0,04	p-value = 0,90	p-value = 0,24
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 9,940$			
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população	p-value = 0,02			

Tabela 18 – Estatística descritiva básica dos dados de K-40 (Bq/kg), de acordo com os grupos considerados para a Ilha de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	I	II	III	IV
Contagem	17	11	7	5
Média	227	306	533	249
Desvio Padrão	83	162	291	238
Mínimo	119	118	216	21
1º quartil	175	211	298	74
Mediana	212	274	464	223
3º quartil	279	359	737	306
Máximo	426	719	984	623
Curtose	3,01	4,97	1,70	2,26
Assimetria	0,81	1,49	0,36	0,73
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,938	W = 0,852	W = 0,923	W = 0,919
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value = 0,29	p-value = 0,04	p-value = 0,50	p-value = 0,52
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 8,529$			
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população	p-value = 0,04			

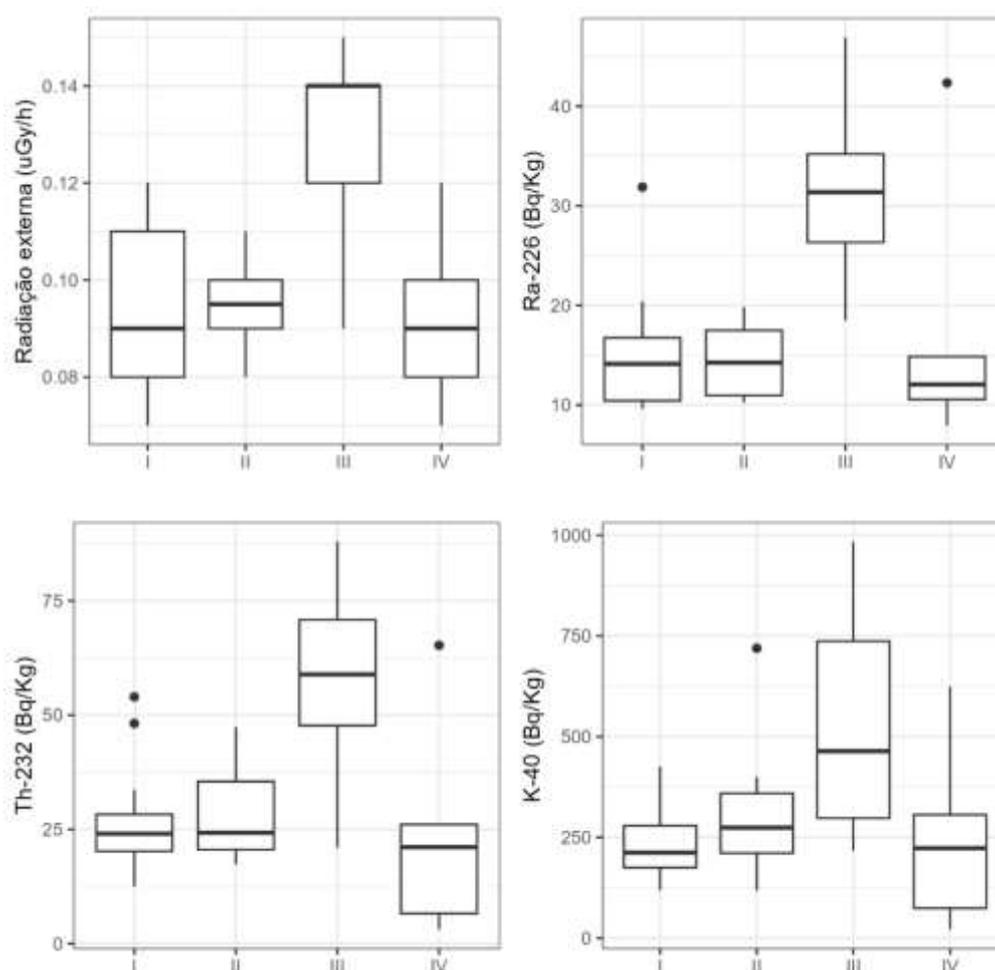


Figura 26 – Diagramas de caixas em função das unidades litológicas consideradas na Ilha de Porto Santo, para as variáveis: radiação externa (uGy/h) e concentração de Ra-226 (Bq/kg), Th-232 (Bq/kg) e K (Bq/kg) em amostras de rocha.

4.3.2.3. TAXA DE DOSE POR EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO GAMA - CALCULADA

À semelhança dos resultados da taxa de dose medidos no decorrer dos trabalhos de campo, também a taxa de dose calculada a partir dos radionuclídeos naturais apresenta diferenças significativas de acordo com o agrupamento de unidades litológicas consideradas. Nomeadamente o grupo III apresenta uma taxa de dose por exposição à radiação gama mais elevada do que os demais (Tabela 19 e Fig. 27).

Tabela 19 – Estatística descritiva básica dos dados de taxa de dose por exposição à radiação gama (nGy/h), calculada a partir dos radionuclídeos naturais, de acordo com os grupos considerados para a Ilha de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	I	II	III	IV
Contagem	17	11	7	5
Média	32,2	36,6	71,7	33,3
Desvio Padrão	10,8	12,3	28,0	31,0
Mínimo	17,0	25,2	32,0	7,6
1º quartil	26,1	28,6	52,6	10,7
Mediana	29,0	33,6	69,4	31,1
3º quartil	39,1	39,4	93,1	31,9
Máximo	56,9	67,8	109,2	85,0
Curtose	2,96	4,74	1,68	2,65
Assimetria	0,77	1,58	-0,03	1,03
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,944	W = 0,803	W = 0,966	W = 0,831
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value = 0,37	p-value = 0,01	p-value = 0,87	p-value = 0,14
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 12,014$			
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população	p-value = 0,01			

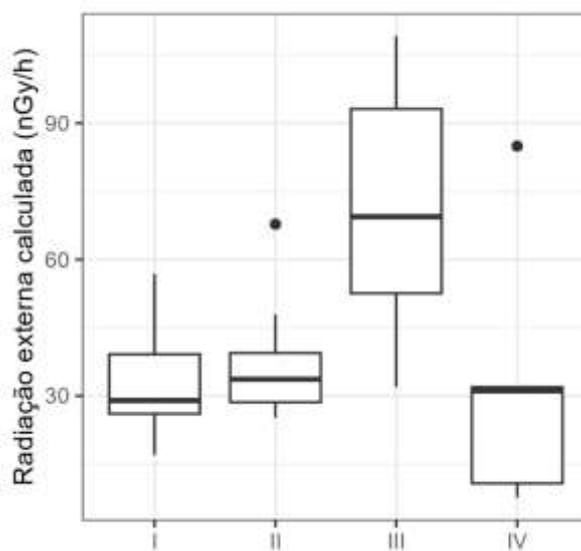


Figura 27 – Diagramas de caixas em função das unidades litológicas consideradas na ilha de Porto Santo e para a variável radiação externa (uGy/h) calculada. Concentrações de atividade do gás radão no ar interior.

4.3.2.4. CONCENTRAÇÃO DE ATIVIDADE DO GÁS RADÃO NO AR INTERIOR

Na tabela 20 encontram-se os parâmetros estatísticos calculados para a ilha de Porto Santo por grupo litológico; recorde-se que em função da distribuição espacial das áreas urbanas apenas é possível obter informação estatística sobre as unidades indicadas na tabela. O resultado do teste de Kruskal-Wallis é significativo para um nível de confiança de 95%. Rejeita-se assim a hipótese nula e considera que as distribuições são individualizáveis. O grupo I apresenta valores tendencialmente mais elevado do que o grupo IV. Ainda assim, ambos apresentam concentrações de radão muito baixas, com apenas um dado acima de 100 Bq/m³ (145 Bq/m³) no grupo I, enquanto todos os restantes locais apresentam concentrações iguais ou inferiores a 51 Bq/m³.

Tabela 20 – Estatística descritiva básica dos dados de concentrações de Rn-222 no ar interior de edifícios (Bq/m³) por litologia na Ilha de Porto Santo, e testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Kruskal-Wallis.

	I	IV
Contagem	10	15
Média	46	23
Desvio padrão	37	13
Mínimo	15	0
1º quartil	25	16
Mediana	41	18
3º quartil	51	32
Máximo	145	50
P(Rn-222 ar >= 300)	0,00	0,00
Teste de Shapiro-Wilk	W = 0,712	W = 0,960
H ₀ : A população apresenta uma distribuição normal	p-value < 0,01	p-value = 0,70
Teste de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 4,693$	
H ₀ : Os grupos provêm da mesma população	p-value = 0,03	

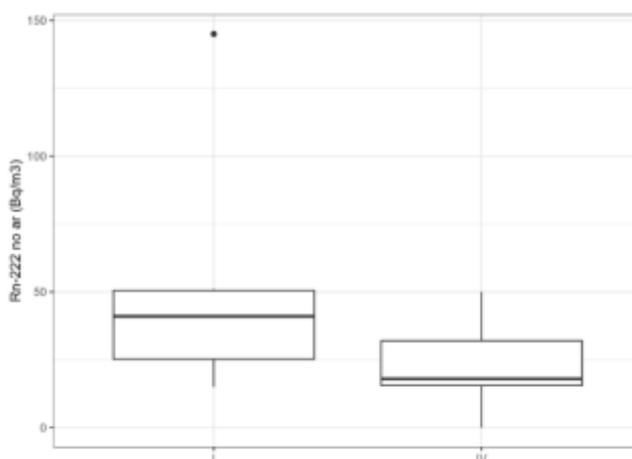


Figura 28 – Diagramas de caixas em função das unidades litológicas consideradas na Ilha de Porto Santo e para a variável concentração de atividade do gás radão no ar interior.

5. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DADOS OBTIDOS

A distribuição espacial dos locais de amostragem e/ou medição dos diferentes parâmetros em apreço reflete a natureza da ocupação dos solos e a topografia das ilhas. Os dados de concentrações de atividade do gás radão no ar interior de edifícios encontram-se naturalmente associados às áreas urbanas. Os dados referentes aos parâmetros geogénicos (radiação externa e concentrações de radionuclídeos naturais) não estão geograficamente tão condicionados, mas de algum modo controlam também a localização dos pontos de amostragem uma vez que os estudos tiveram naturalmente em conta a distribuição das áreas urbanas. Justifica-se, assim, a maioria dos dados esteja localizada essencialmente na zona costeira, em particular na Ilha da Madeira. No caso da ilha de Porto Santo, pela dimensão e topografia mais suave, a informação encontra-se espacialmente um pouco mais dispersa, embora, e no caso do radão no ar das habitações, os dados encontram-se concentrados nas áreas mais planas, na zona central e no litoral Sul.

Pelas razões expostas, as técnicas tradicionais de análise e interpolação espacial não são adequadas ao caso presente, pelo que a análise estatística com base em unidades litológicas é mais robusta, tal como atrás discutido. Ainda assim, nos próximos subcapítulos são apresentados e descritos os mapas das diferentes variáveis com os resultados para cada ponto de amostragem apenas para uma avaliação qualitativa ou semi-quantitativa.

5.1. Ilha da Madeira

Na Ilha da Madeira a classe mais baixa de taxa de dose por exposição à radiação externa ($<0,08 \mu\text{Gy/h}$) encontra-se mais representada na zona nordeste e leste da ilha (Fig. 29). A distribuição espacial dos valores da concentração de atividade de Ra-226 em amostras de rocha mostra a existência de alguma homogeneidade, registando-se os valores da classe mais alta ($>26,3 \text{ Bq/kg}$) nas unidades litológicas b1 e b2 (Fig. 20). O mesmo sucede com as concentrações de Th-232, cuja classe mais elevada ($> 39,7 \text{ Bq/kg}$) se encontra igualmente espacialmente dispersa pelas unidades b1, b2, b5 e b6 (Fig. 31). Relativamente às concentrações de K-40 a distribuição mostra também relativa homogeneidade (Fig. 32). Quanto às concentrações de Rn-222 na atmosfera interior de edifícios, também não se verifica nenhuma tendência espacial, com valores

da classe mais elevada ($> 300 \text{ Bq/m}^3$) a ocorrerem dispersos pela ilha, associados às unidades Q, b1 e b2 (Fig. 33).

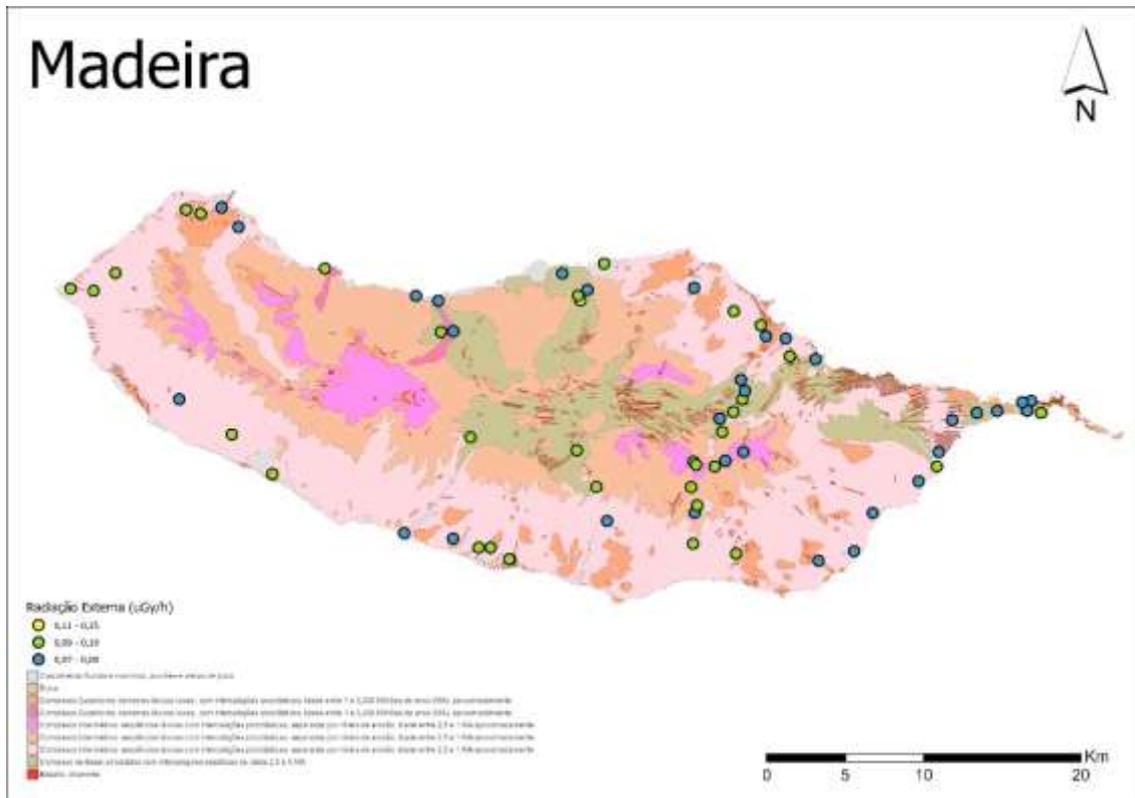


Figura 29 – Distribuição espacial dos dados de radiação externa (uGy/h) na Ilha da Madeira. Cartografia geológica à escala 1:80 000 (LNEG, 2009).

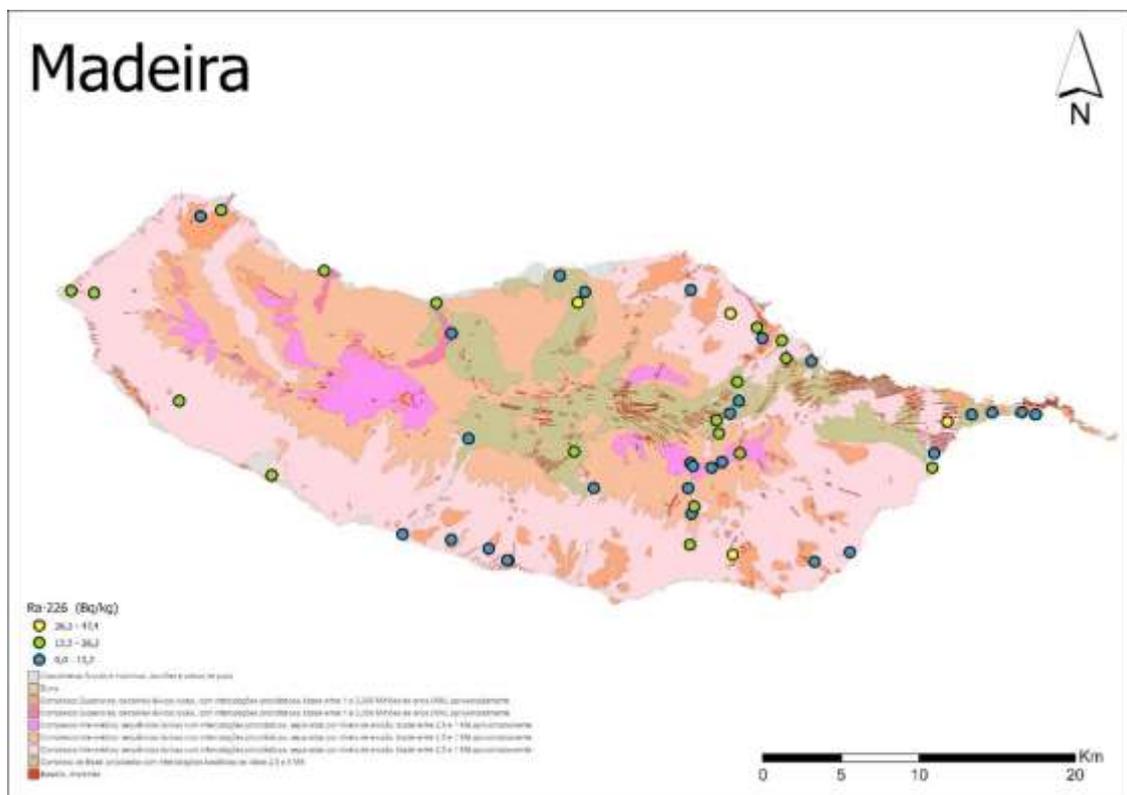


Figura 30 – Distribuição espacial dos dados de Ra-226 (Bq/kg) na Ilha da Madeira. Mapa de base: cartografia oficial à escala 1:80 000. Cartografia geológica à escala 1:80 000 (LNEG, 2009).

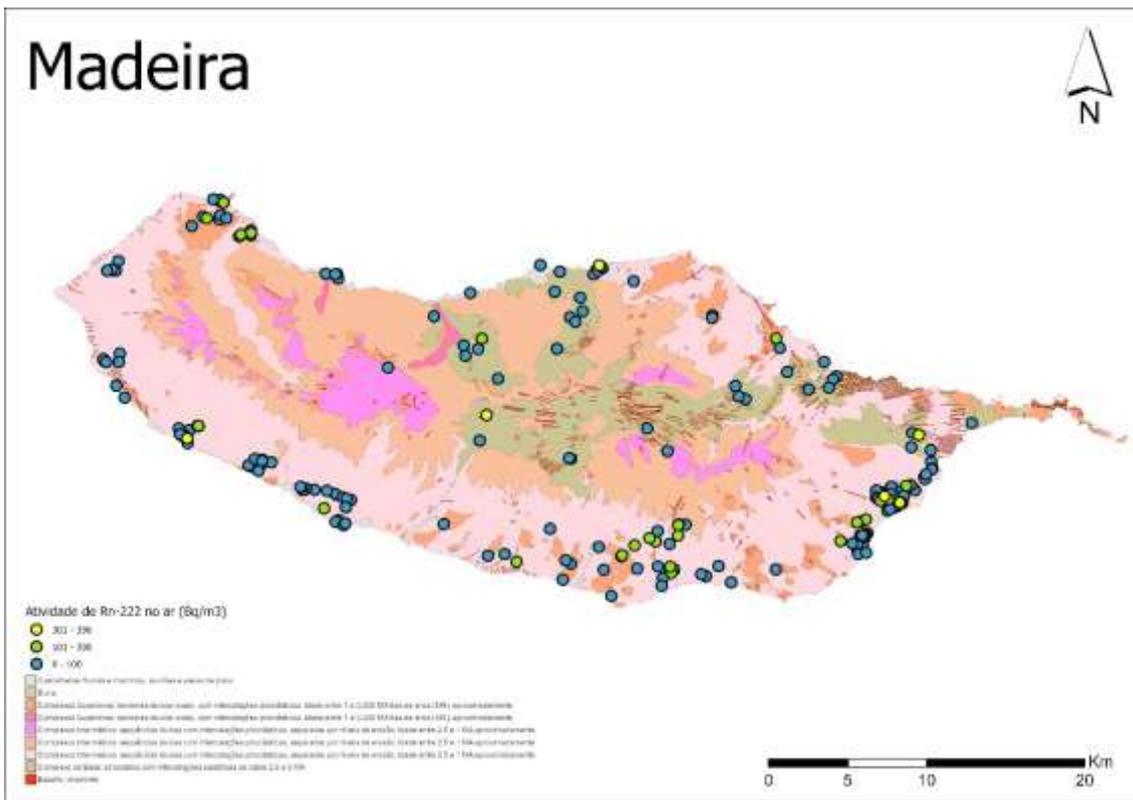


Figura 33 – Distribuição espacial dos dados de Rn-222 no ar interior de edifícios (Bq/m³) na Ilha da Madeira. Cartografia geológica à escala 1:80 000 (LNEG, 2009).

5.2. ILHA DO PORTO SANTO

Na Ilha de Porto Santo o padrão de variação é distinto em relação à ilha da Madeira. As classes de valores mais elevadas, quer da taxa de exposição à radiação gama (Fig. 34), quer das concentrações de radionuclídeos naturais (Figs. 35, 36 e 37), ocorrem mais frequentemente no interior da ilha, em particular na zona leste, especialmente associados ou nas proximidades das unidades de natureza traquítica. Comparativamente à Ilha da Madeira, dominam as classes de valores intermédios, enfatizando o maior fundo radiológico da Ilha do Porto Santo. Relativamente às concentrações de Rn-222 na atmosfera interior de edifícios, todos os valores se enquadram na classe mais baixa (< 100 Bq/m³) com exceção de um valor na classe intermédia (Fig. 38).

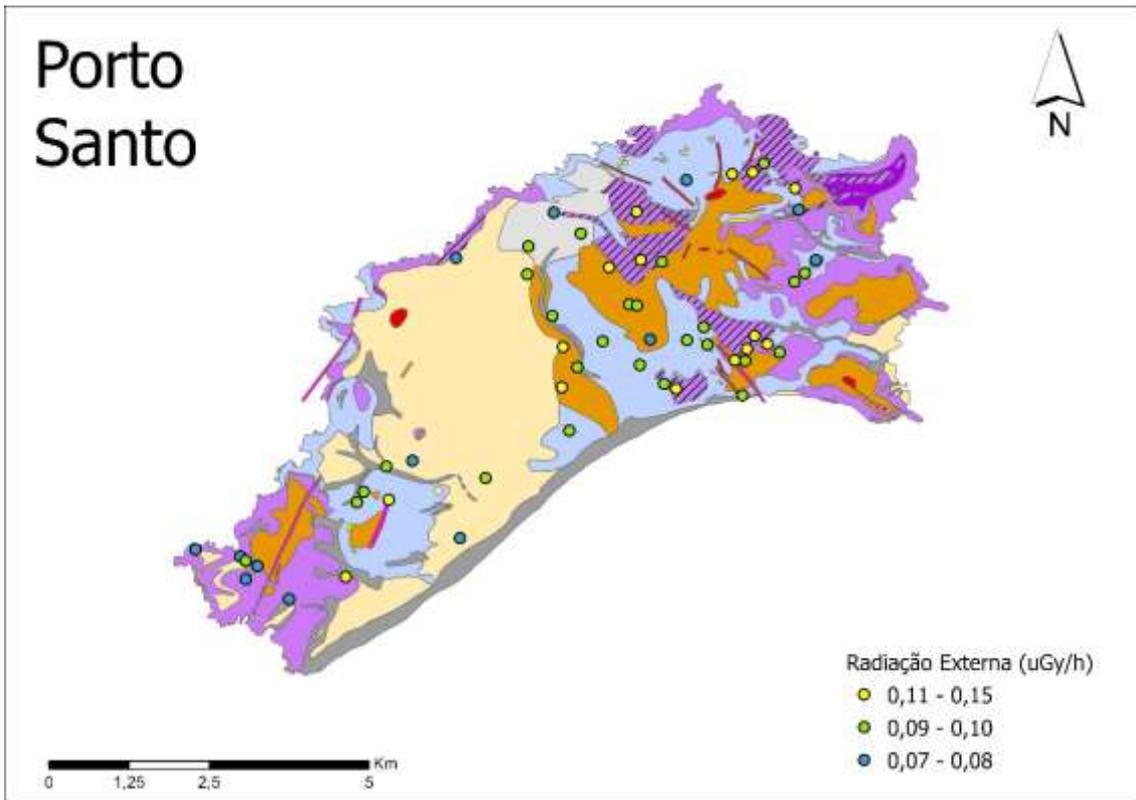


Figura 34 – Distribuição espacial dos dados de radiação externa (uGy/h) na Ilha de Porto Santo. Cartografia geológica adaptada de LNEG (2009) à escala 1:80 000 (para referência da legenda ver Anexo A.2).

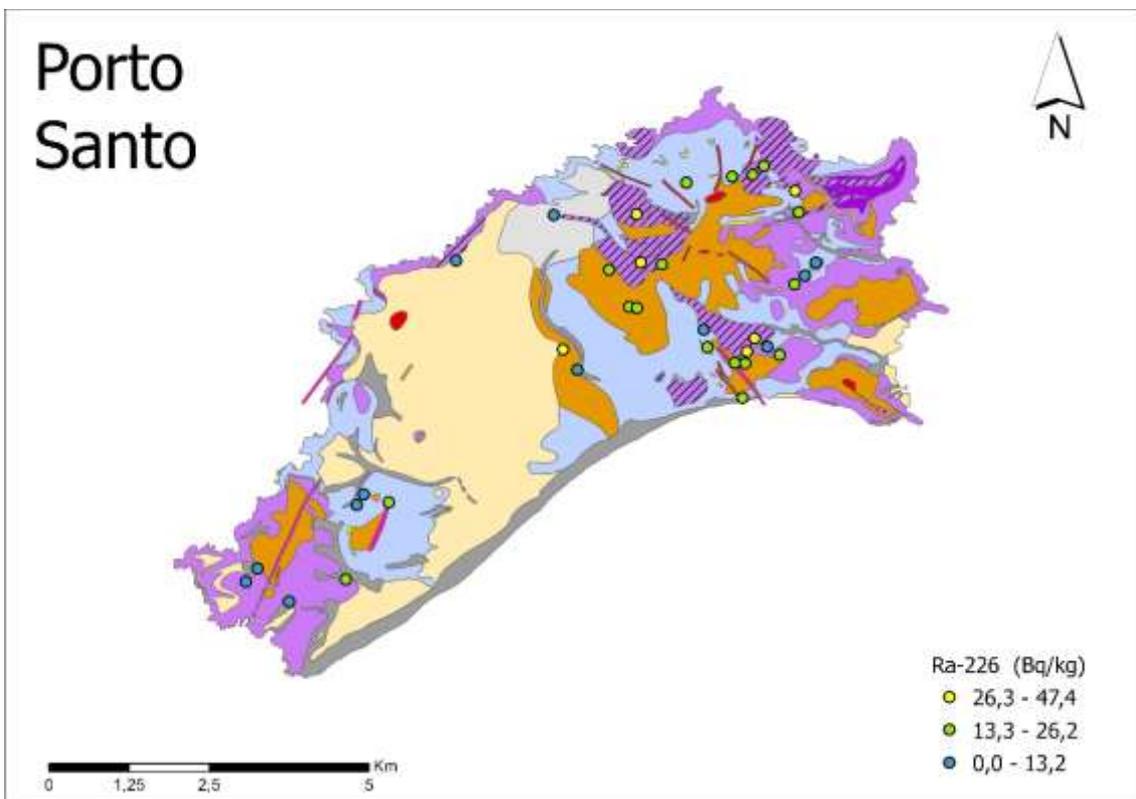


Figura 35 – Distribuição espacial dos dados de Ra-226 (Bq/kg) na Ilha de Porto Santo. Cartografia geológica adaptada de LNEG (2009) à escala 1:80 000 (para referência da legenda ver Anexo A.2).

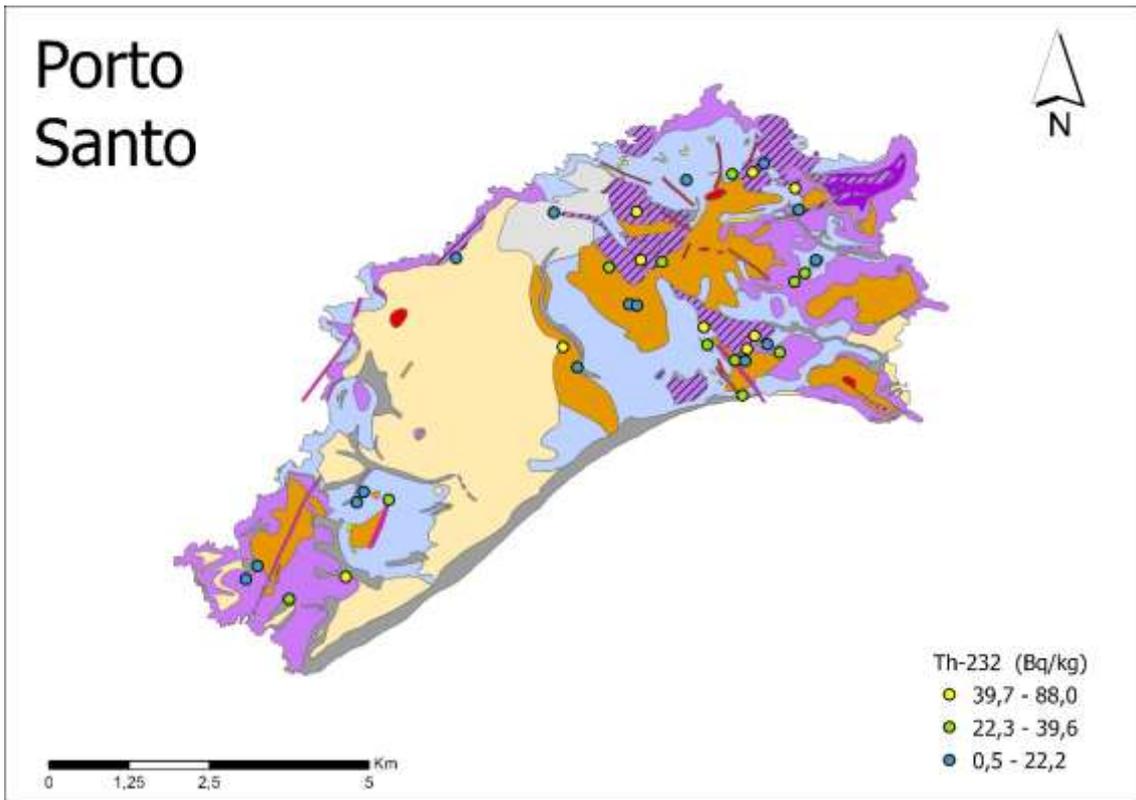


Figura 36 – Distribuição espacial dos dados de Th-232 (Bq/kg) na Ilha de Porto Santo. Cartografia geológica adaptada de LNEG (2009) à escala 1:80 000 (para referência da legenda ver Anexo A.2).

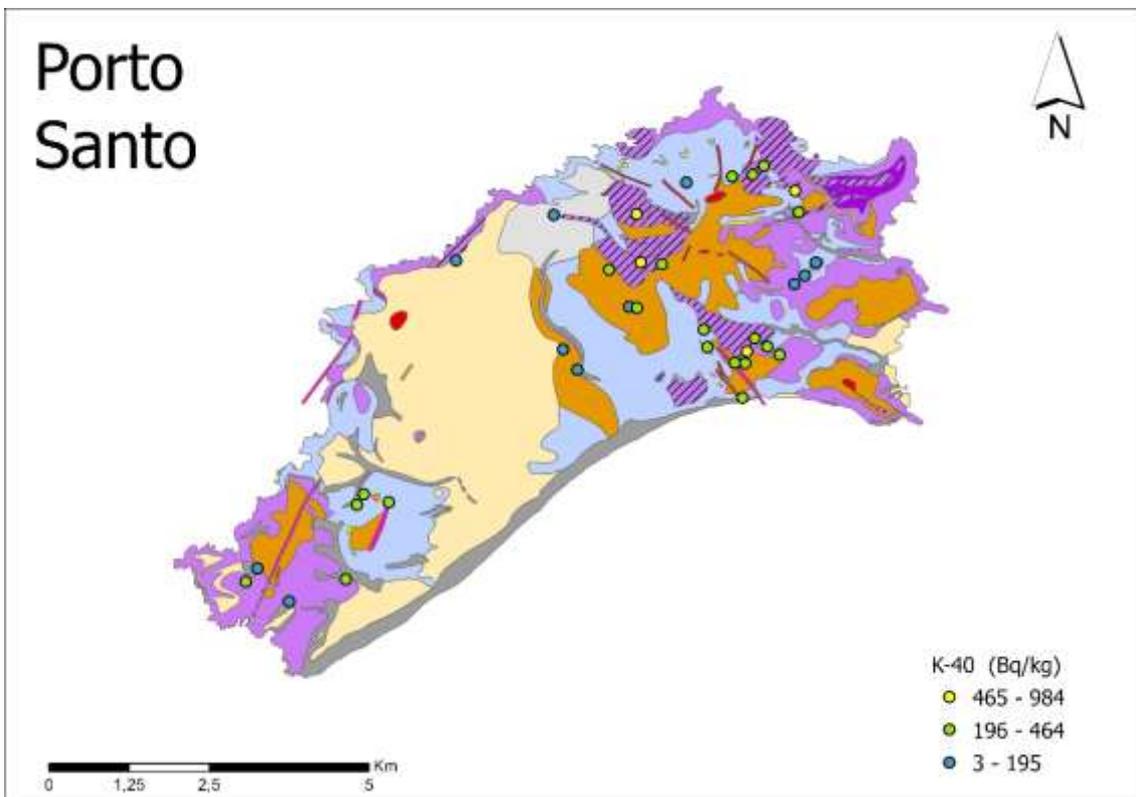


Figura 37 – Distribuição espacial dos dados de K-40 (Bq/kg) na ilha de Porto Santo. Cartografia geológica adaptada de LNEG (2009) à escala 1:80 000 (para referência da legenda ver Anexo A.2).

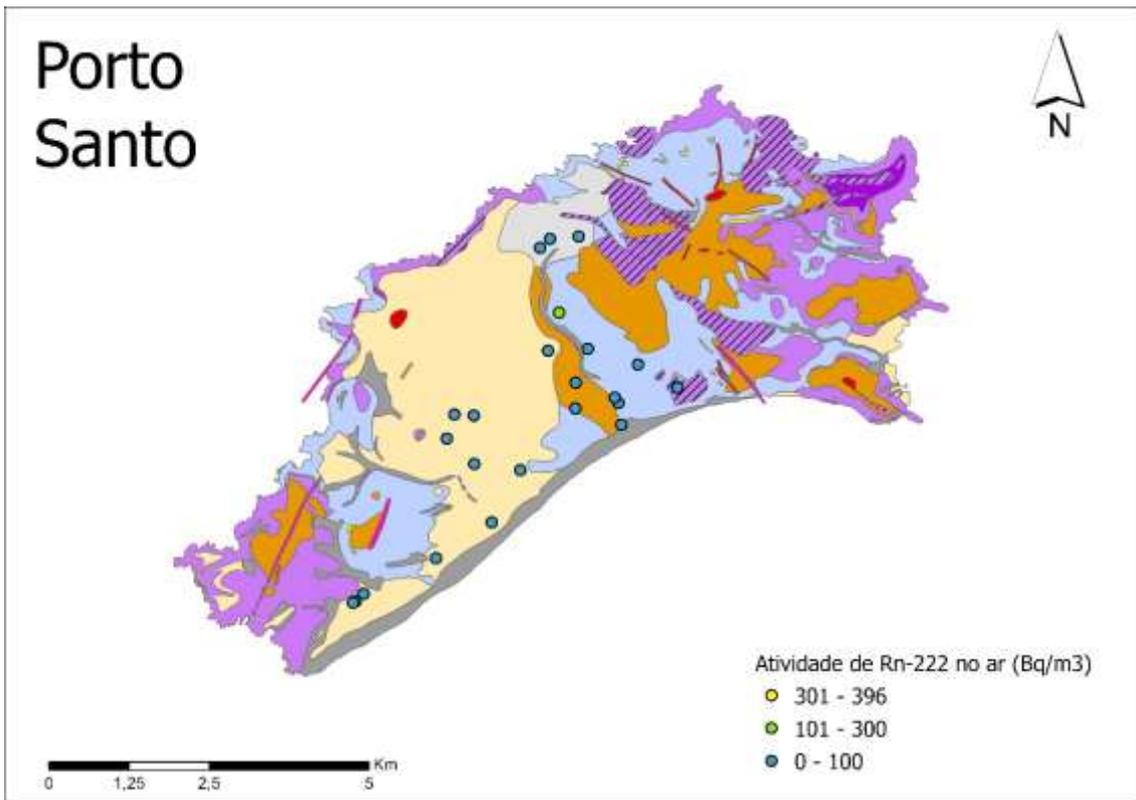


Figura 38 – Distribuição espacial dos dados de Rn-222 no ar interior de edifícios (Bq/m^3) na ilha de Porto Santo. Cartografia geológica adaptada de LNEG (2009) à escala 1:80 000 (para referência da legenda ver Anexo A.2).

6. CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR E AS CARACTERÍSTICAS DA HABITAÇÃO

Conjuntamente com os detetores distribuídas na 2ª fase da campanha de amostragem, foi efetuado um pequeno inquérito relativo às características dos edifícios analisados. Neste inquérito foram analisadas seis características:

- Tipo de edifício analisado (apartamento, moradia, ...);
- Local de colocação do detetor (cozinha, quarto, sala, hall, ...);
- Andar de colocação detetor (rés-do-chão, 1º andar, ...);
- Andares que compõem o edifício (cave, rés-do-chão, 1º andar, ...);
- Tipo de janelas (com vidros duplos, sem vidros duplos, ...);
- Tipo de ventilação (natural, mecânica, ...).

O inquérito foi analisado com recurso a estatística descritiva, de acordo com a tabela 21. Para um nível de confiança de 95% verifica-se que apenas a tipologia de ventilação utilizada apresenta diferenças significativas. Locais analisados que dispõem de ventilação mecânica apresentam concentrações de Rn-222 no ar mais reduzidas do que locais que dispõem exclusivamente de ventilação natural (Fig. 39). Ainda que expectável, devido à renovação do ar interior, a significância do resultado deve ser mantida em consideração devido ao reduzido número de análises ($n = 3$) de habitações com ventilação mecânica.

Tabela 21 – Parâmetros estatísticos básicos das concentrações de Rn-222 no ar interior dos edifícios. Resultados em função das diferentes classes para as seis variáveis do inquérito realizado aquando da distribuição dos detetores da 2ª fase da campanha. Abreviaturas: N – contagem; μ - média; σ – desvio padrão; Mín. – mínimo; Q1 – 1º quartil; Med. – Mediana; Q3 – 3º quartil; Máx. – Máximo; NA – Não aplicável.

Variáveis / Classes	N	μ	σ	Mín.	Q1	Med.	Q3	Máx.	Teste Shaplo-Wilk	Teste Kruskal-Wallis	de
Tipo de edifício											
edifício de serviços 1	2	13	4	10	12	13	15	16	-		
apartamento	1	26	NA	26	26	26	26	26	-		
edifício de serviços 2	1	22	NA	22	22	22	22	22	-		
moradia	45	62	70	11	28	37	64	354	W=0,617 p-value < 0,01	--	
edifício de serviços 3	1	47	NA	47	47	47	47	47	-		
Local de colocação											
corredor	4	25	7	18	21	24	28	34	W = 0,971 p-value = 0,850		
cozinha	4	47	14	35	37	44	55	65	W = 0,902 p-value = 0,439		
escritório	1	16	NA	16	16	16	16	16	-	$\chi^2 = 6,228$	
garagem	2	50	18	37	44	50	57	63	-	p-value = 0,10	
hall de entrada	1	22	NA	22	22	22	22	22	-		
quarto	6	38	32	19	23	28	30	103	W = 0,621 p-value < 0,01		
sala	31	72	81	11	28	42	90	354	W = 0,665 p-value < 0,01		
sala reunião	1	10	NA	10	10	10	10	10	-		
Andar de colocação											
1º andar	17	43	32	10	21	30	51	115	W = 0,837 p-value < 0,01	$\chi^2 = 1,071$	
rés-do-chão	33	66	79	13	28	38	63	354	W=0,604 p-value < 0,01	p-value = 0,30	
Andares totais do edifício											
cave (e subcaves) e rés-do-chão	1	18	NA	18	18	18	18	18	-		
cave (e subcaves), rés-do-chão e 1º andar	3	29	11	19	24	28	35	41	W = 0,989 p-value = 0,80	$\chi^2 = 4,635$	
rés-do-chão	8	35	28	13	18	25	40	99	W = 0,765 p-value = 0,01	p-value = 0,20	
rés-do-chão e 1º andar	35	58	61	10	28	37	64	354	W = 0,604 p-value < 0,01		
rés-do-chão, 1º andar e 2º ou mais andares	3	167	151	21	90	159	241	322	W = 0,998 p-value = 0,91		
Tipo de janelas											
com vidros duplos	20	86	95	18	33	46	100	354	W = 0,682 p-value < 0,01		
misto (com ambos)	1	18	NA	18	18	18	18	18	-		
não sabe	2	13	4	10	12	13	15	16	-		
não tem janelas na garagem (sem vidros duplos no resto da habitação)	1	63	NA	63	63	63	63	63	-	$\chi^2 = 3,265$	
sem vidros duplos	26	42	28	11	23	33	50	115	W = 0,837 p-value < 0,01	p-value = 0,07	
Tipo de ventilação											
apenas natural	47	61	68	11	28	37	64	354	W = 0,609 p-value < 0,01	$\chi^2 = 5,815$	
mecânica (centralizada na moradia/no prédio)	3	16	6	10	13	16	19	22	W = 1,000 p-value = 1,00	p-value = 0,02	

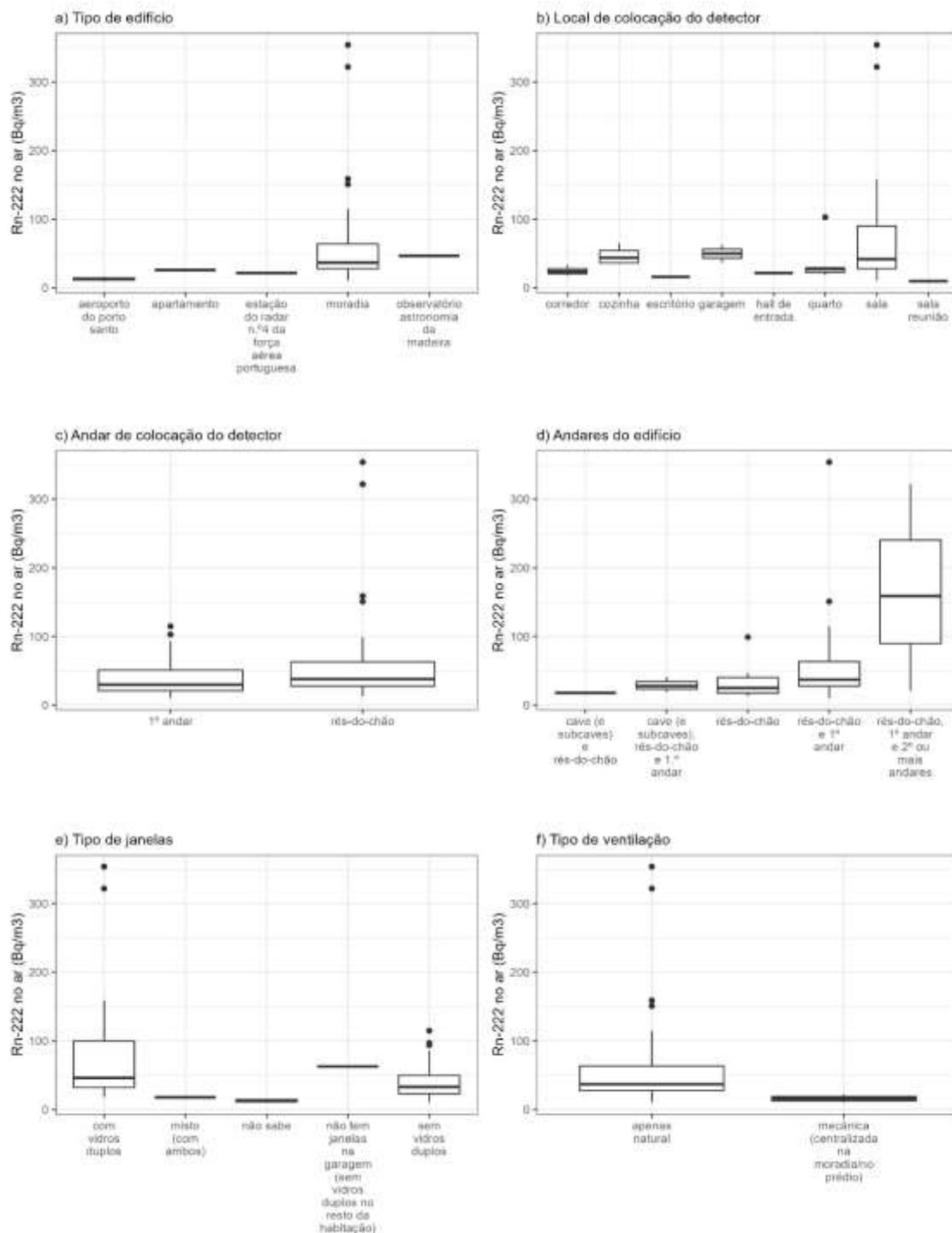


Figura 39 – Diagramas de caixas em função da concentração de Rn-222 e das diferentes classes para as variáveis do inquérito realizado aquando da distribuição dos detetores da 2ª fase da campanha: a) Tipo de edifício; b) Local de colocação do detector; c) Andar de colocação do detector; d) Andares do edifício; e) Tipo de janelas; f) Tipo de ventilação.

6.1. Efeito do declive do terreno na concentração do gás radão no ar interior

A maior percentagem de edifícios com concentrações de Rn-222 em edifícios na Madeira, como anteriormente já referido, não seria expectável face aos resultados obtidos de radiação externa e das concentrações de radionuclídeos, mais elevados no Porto Santo do que na Madeira.

Uma possível explicação poderia estar relacionada com o contraste de topografia entre as duas ilhas e a sua influência no tipo de construções (Fig. 40). No caso da Madeira e, no sentido de avaliar o impacto do declive do local onde o edifício utilizado se encontra, foi efetuada uma regressão logística entre o declive e uma classe binária que diferencia os edifícios entre aqueles que apresentam concentrações de Rn-222 no ar acima do nível de referência nacional (300 Bq/m^3) e aqueles que apresentam concentrações mais baixas do que esse mesmo nível. O resultado da regressão logística (Tabela 22) não é significativo, pelo que o declive não deve ser considerado para a aplicação de um sistema de classificação binário.

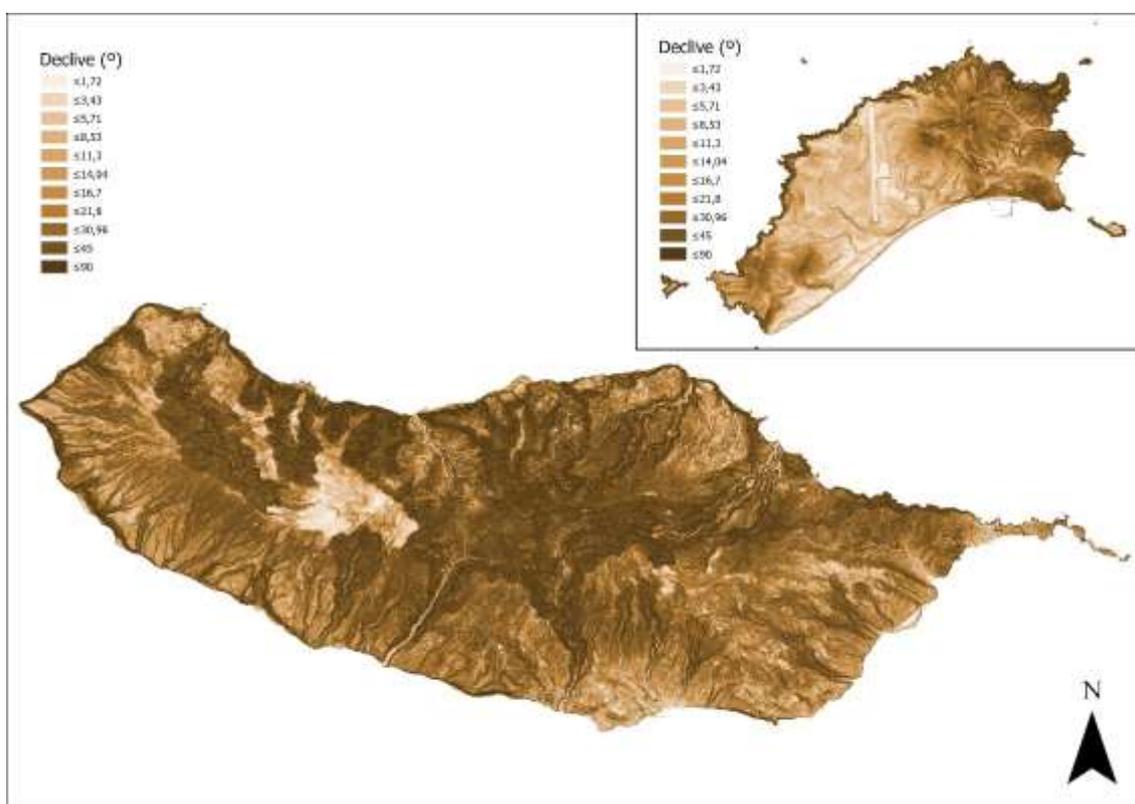


Figura 40 – Mapa do declive da Ilha da Madeira e da Ilha de Porto Santo.

Ainda que o declive não seja estatisticamente significativo para a elaboração de um sistema de classificação binário, foi avaliada a sua contribuição para a variabilidade dos resultados de Rn-222 no ar através da técnica de regressão linear. Os parâmetros calculados são também eles não significativos para um nível de confiança de 95% e o R^2 é muito reduzido (0,02; Tabela 23), pelo que se assume que o declive não explica a variabilidade dos resultados encontrados.

Tabela 22 – Resultado da regressão logística entre o declive e a classe binária (< 300 Bq/m³ >).

	Estimativa	Erro Padrão	z-value	p-value
(interceção)	-4,25	0,77	-5,52	< 0,01
Declive	0,05	0,04	1,51	0,13

Tabela 23 – Contribuição para a variabilidade dos resultados de Rn-222 no ar através da técnica de regressão linear.

	Estimativa	Erro Padrão	z-value	p-value	R²
(interceção)	44,75	9,90	4,52	< 0,01	0,02
Declive	1,11	0,61	1,80	0,07	

7. MAPA DE RISCO DE EXPOSIÇÃO AO GÁS RADÃO

7.1. Método da classificação binário

Pretende-se com os trabalhos elaborados, para além do objetivo principal de elaborar o mapa de risco de exposição ao gás radão das ilhas da Madeira e de Porto Santo, também harmonizar este mesmo mapa com o já elaborado para o território de Portugal continental. Procede-se assim à identificação das áreas onde é esperada uma maior exposição ao radão recorrendo a um método simples de classificação binária, tal como descrito por Bossew (2014). Este autor aplicou essa metodologia à classificação de zonas mais suscetíveis à exposição ao radão (ZSER). O método em apreço permite classificar uma dada área (neste caso, a área correspondente a uma unidade geológica) como uma ZSER ou não-ZSER com base nos dados disponíveis, que são utilizados como preditores, ou *proxies*, através de sistemas de classificação binária treinados para cada uma das variáveis independentes (radiação externa e concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais). Para efeitos da aplicação do método, considerou-se como critério para definição de área de elevado risco de exposição ao radão quando é expectável que a concentração de radão no ar seja igual ou superior ao nível de referência de 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios nessa área. Nesta situação, a classificação binária assume o valor de 1. Quando não é esperada uma concentração de radão no ar igual ou superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios nessa área, a classificação binária assume o valor 0.

No presente relatório foi utilizada a técnica de regressão logística para avaliar a aplicabilidade de um sistema de classificação binário para as diferentes variáveis em apreço com o propósito de prever a ausência (zeros) ou presença (uns) de edifícios cujas concentrações de radão no ar ultrapassam o nível de referência nacional de 300 Bq/m³, com base nas variáveis independentes, nomeadamente a radiação externa e as concentrações dos radionuclídeos naturais. Para efeitos de aplicação do método, quer no território continental quer no presente relatório, a classificação binária da concentração de radão nos edifícios em função do nível de referência nacional (300 Bq/m³) foi comparada com cada variável independente recorrendo às medianas de cada unidade geológica considerada (apresentadas nas Tabelas 9 a 20). Optou-se pela utilização da mediana dado constituir uma medida de tendência central robusta para as distribuições observadas (ver capítulo 4.3).

Como se verifica nas tabelas 14 e 20, nenhuma das unidades apresenta medianas superiores ao nível de referência nacional (300 Bq/m³), pelo que não é possível treinar os modelos de classificação desta forma. Foi ainda explorada a viabilidade de utilizar a totalidade dos valores individuais referentes à concentração de gás radão no ar interior, em alternativa ao uso da mediana, mantendo este parâmetro para as restantes variáveis proxy e por unidade geológica. Os resultados do modelo de regressão logística encontram-se expressos na tabela 24. Estes não demonstram significância para nenhuma das variáveis em apreço, pelo que se pode concluir que não é exequível treinar um sistema de classificação binário.

Tabela 24 – Resultados do modelo de regressão logística para os radionuclídeos naturais e radiação externa.

	Estimativa	Erro Padrão	z-value	p-value
(interceção)	-52,55	42149	-0,001	1,00
Ra-226	0,9	419	0,002	1,00
Th-232	3,39	1372	0,002	1,00
K-40	0,42	159	0,002	1,00
Radiação externa	-1198,66	1076503	-0,001	1,00

Em alternativa, para a elaboração do mapa de risco de exposição ao gás radão da Ilha da Madeira e da Ilha de Porto Santo, foi utilizado o sistema de classificação elaborado e treinado para a elaboração do mapa de risco de exposição ao gás radão de Portugal continental (Domingos *et al.*, 2021). O método de classificação binária adotado baseia-se na análise da curva característica de operação do recetor (do inglês “*Receiver Operating Characteristic Curve*”, ROC), que corresponde a uma representação gráfica do desempenho de um sistema de classificação binário. A análise da curva ROC permite avaliar diferentes classificadores binários, representados por um ponto na curva ROC, com base na sua performance (Fawcett, 2006), de modo a otimizar a relação de custo-benefício entre verdadeiros positivos (VP) e falsos positivos (FP) e a relação entre falsos positivos (FP) e falsos negativos (FN). É utilizada uma matriz de confusão com dimensão 2 x 2 entre as condições observadas (colunas) em função do critério estabelecido relativamente à concentração de radão em edifícios e as classificações previstas (linhas), com base num limite classificador de uma variável independente (e.g., Ra-226 em rocha). O treino do modelo de classificação é efetuado aumentando de forma sequencial o limite classificador da variável independente e registando a matriz de confusão obtida para cada classificador. A partir das matrizes de confusão são calculados outros parâmetros importantes, nomeadamente a Taxa de Verdadeiros Positivos e a Taxa de Falsos Positivos, utilizadas para a construção da curva ROC. Para

além da indicação visual da curva ROC, existem vários parâmetros que podem ser usados como indicadores do valor ótimo do preditor tais como o parâmetro Y de Youden, d01, a exatidão, kappa de Cohen e o coeficiente de correlação de Matthews (e.g., Bossew, 2014). No âmbito da elaboração do mapa de risco de exposição ao gás radão para o território continental considerou-se como valor ótimo o valor que maximiza o parâmetro Y de Youden. Na tabela 25, encontram-se sintetizados os valores ótimos para cada variável em apreço, estimados para o território de Portugal continental.

Tabela 25 – Valores ótimos para cada variável estimados para o território de Portugal continental.

Variável	Valor ótimo
Taxa de dose por exposição à radiação externa	79,7 nGy/h
Ra-226 em amostras de rocha	32,1 Bq/kg
Urânio em amostras de rocha	3,9 mg/kg

Com base na classificação obtida de acordo com a concentração de radão observada no interior dos edifícios, bem como a classificação estimada com base no valor ótimo definido para cada um dos parâmetros (Tabela 25), sintetiza-se na tabela 26 os resultados da classificação binária por unidade geológica. Recorde-se que 1 representa a situação em que a concentração de radão em edifícios é expectável de ser igual ou superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios, enquanto o valor 0 representa a situação em que isso não é observado.

Para a classificação final do mapa de risco de exposição ao gás radão foi calculado um Índice de Risco (IR), de acordo com a seguinte equação:

$$IR = 0,5 \times C_{CRE} + 0,5 \times \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (Eq. 2)$$

onde C_{CRE} corresponde à classificação binária atribuída de acordo com as medianas de concentração de radão no ar interior de edifícios, e C_i é a classificação binária estimada a partir das variáveis geogénicas i , e n o número de variáveis com informação disponível. Para o cálculo do IR foram então consideradas como variáveis geogénicas a concentração de Ra-226 em amostras de rocha, a concentração de urânio em amostras de rocha (retirado da literatura) e a taxa de dose por exposição à radiação gama, calculada a partir das concentrações de atividade dos radionuclídeos naturais K-40, Ra-226 e Th-232. As classificações binárias, bem como o IR, por unidade considerada, são apresentados na tabela 26. Para os casos particulares das unidades d e q, aflorantes na Ilha da Madeira, como não disponham de outras variáveis geogénicas, a classificação atribuída (0) foi assumida com base nas medianas de

radiação externa medida no campo (0,08 e 0,09 uGy/h, respetivamente) em comparação com a mediana da mesma variável para a Ilha da Madeira (0,09 μ Gy/h), a qual corresponde a uma taxa de dose calculada de 25,4 (nGy/h).

Tabela 26 – Resultados da classificação binária por base de dados (0 ou 1) e índice de risco por unidade geológica.

	Radiação externa calculada	Ra-226	U	Rn-222 no ar	Índice de Risco
Madeira					
b1	0	0		0	0
b2	0	0		0	0
b3	0	0		0	0
b4	0	0		0	0
b5	0	0	0	0	0
b6	0	0		0	0
d	0*	n.d.		n.d.	0
q	0*	n.d.		0	0
Porto Santo					
I	0	0		0	0
II	0	0		0	0
III	0	0	0	0	0
IV	0	0		0	0

n.d. – não determinado; *- assumido com base na radiação externa medida, comparativamente às outras unidades.

O índice de risco varia entre 0 e 1. Este será máximo no caso de todas as variáveis com informação disponível convergirem no mesmo ponto, ou seja, observação da concentração de radão na atmosfera interior igual ou superior a 300 Bq/m³ em pelo menos 10 % dos edifícios. Para efeitos de mapeamento do nível de risco, considera-se que as unidades geológicas que possuem um índice de risco inferior a 0,33 pertencem a um risco de exposição ao radão baixo. As unidades que apresentam um índice de risco igual ou superior a 0,33 e inferior a 0,67 são classificadas no nível risco médio e as unidades que apresentam um índice de risco igual ou superior a 0,67 são classificadas no nível de risco elevado. Os mapas de risco ao gás radão são apresentados nas figuras 41 e 42.

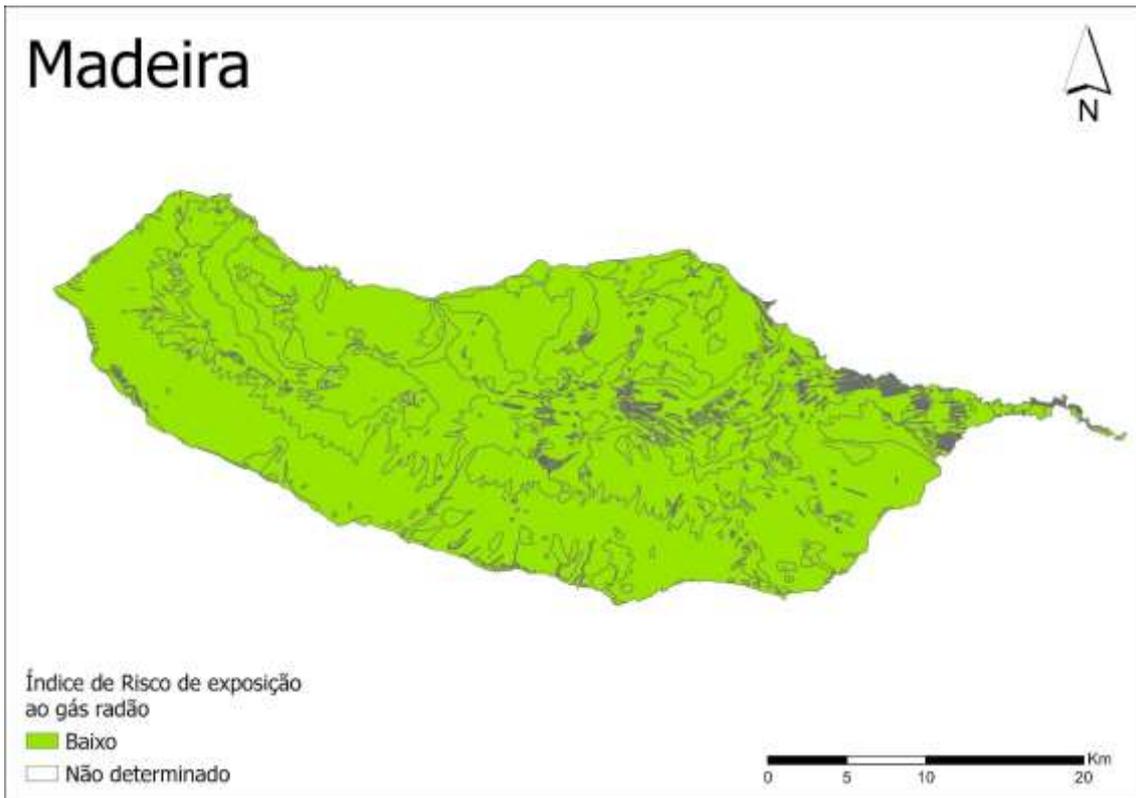


Figura 41 – Mapa do nível de risco ao gás radão em edifícios para a Ilha da Madeira.

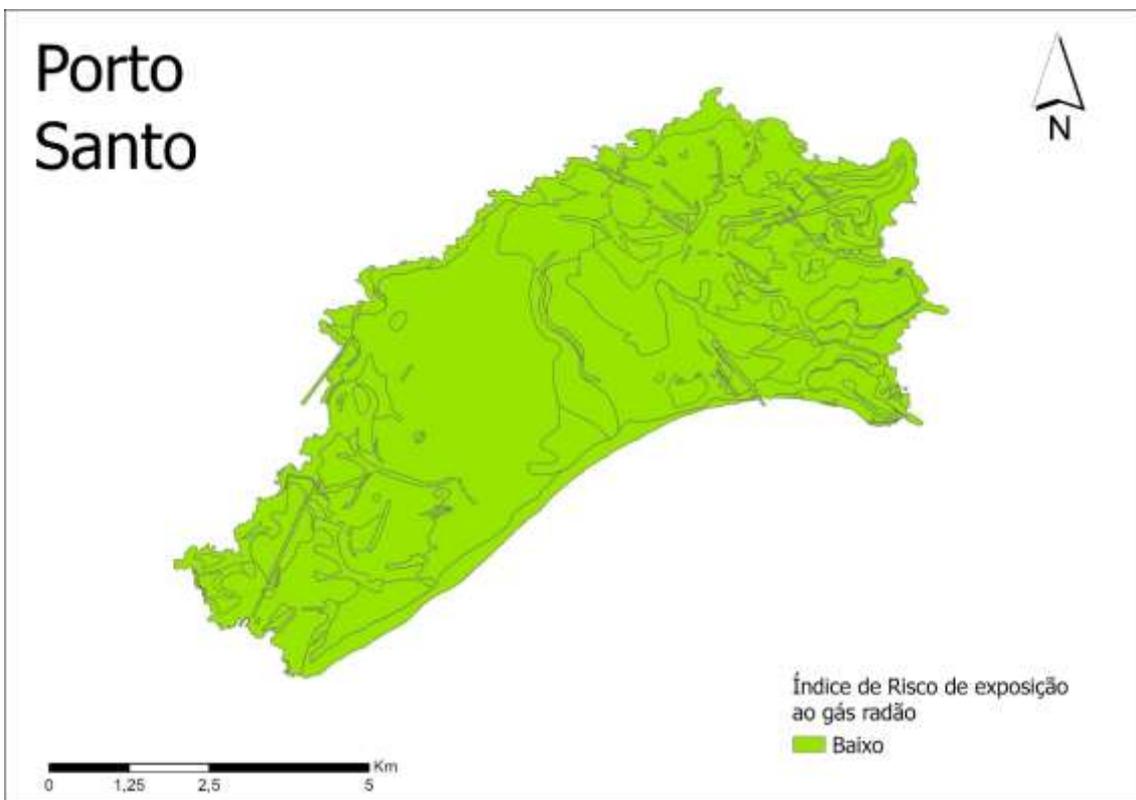


Figura 42 – Mapa do nível de risco ao gás radão em edifícios para a Ilha de Porto Santo.

Assim, e em síntese, concluiu-se que o risco de exposição ao gás radão é similar em ambas as ilhas e de nível baixo.

8. MAPA DE SUSCETIBILIDADE DE EXPOSIÇÃO AO GÁS RADÃO

Para estender na totalidade a metodologia dos trabalhos desenvolvidos no território continental ao arquipélago da Madeira, procedeu-se à transposição da informação do mapa de risco elaborado (figuras 41 e 42) para um mapa de suscetibilidade de exposição ao gás radão. Este último define as zonas de risco, elaboradas com base nas unidades geológicas por divisão administrativa de terceiro nível (freguesias). Dado que não existe correspondência espacial entre as unidades geológicas e as unidades administrativas em apreço, as mesmas interseam-se entre si podendo a mesma unidade administrativa englobar porções de várias unidades geológicas e por consequência vários índices de risco. Como tal, para proceder à transformação espacial em consideração foram seguidos os critérios previamente definidos no Plano Nacional para o Radão (Resolução do Conselho de Ministros n.º 150-A/2022), os quais se transpõem na integridade nas seguintes alíneas:

- i) Freguesia com mais de 10 % de área de risco elevado — Freguesia de suscetibilidade elevada;
- ii) Freguesia com mais de 10 % de área de risco moderado e com menos de 10% de área de risco elevado — Freguesia de suscetibilidade moderada;
- iii) Freguesia com menos de 10 % de área de risco elevado e menos de 10 % de área de risco moderado — Freguesia de suscetibilidade baixa.

Os mapas de suscetibilidade de exposição ao gás radão para as ilhas da Madeira e de Porto Santo encontram-se nas figuras 43 e 44, respetivamente. Tendo em consideração que todas as unidades geológicas estudadas apresentavam um nível de risco baixo, o mesmo se reflete no mapa de suscetibilidade, com todas as freguesias classificadas com nível de suscetibilidade baixo de exposição ao gás radão. A lista completa dos níveis de suscetibilidade de exposição ao gás radão por freguesias encontra-se no Anexo C.



Figura 43 – Mapa do nível de suscetibilidade ao gás radão em edifícios para a Ilha da Madeira.

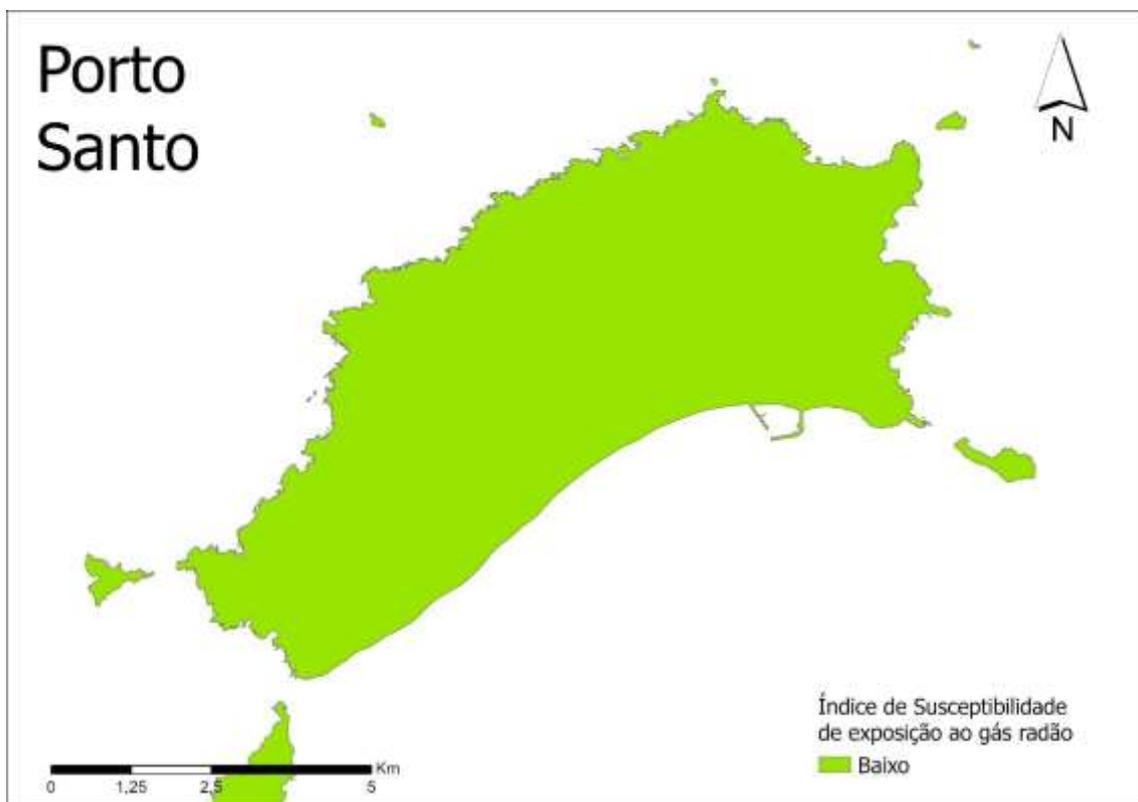


Figura 44 – Mapa do nível de suscetibilidade ao gás radão em edifícios para a Ilha de Porto Santo.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos realizados no presente estudo tiveram por objetivo a obtenção no espaço geográfico das ilhas da Madeira e do Porto Santo dos dados necessários e suficientes para diversas variáveis que possibilitassem a modelação e consequente estimativa do risco de exposição ao gás radão nos espaços interiores localizados em ambas as ilhas. Para o efeito, e com suporte em trabalhos de campo e de laboratório, avaliaram-se os seguintes parâmetros: taxa de dose por exposição à radiação gama, concentração de atividade dos radioisótopos presentes nos materiais geológicos e ainda, medições sobre a distribuição das concentrações de gás radão no ar interior de edifícios/habitações. Neste último caso, incluíram-se ainda os dados obtidos numa campanha anterior, resultado de uma parceria entre a DRAAC e a Agência Internacional de Energia Atómica – AIEA, nas ilhas em causa, mas também, e de uma forma isolada nas ilhas Selvagens e Desertas.

Atendendo à reconhecida importância que as variáveis de natureza geogénica têm no controlo e na distribuição do radão no interior das habitações, considerou-se como elemento de base de suporte a todo o trabalho de investigação a unidade geológica, tal como individualizado e mapeado à escala 1: 80 000. O substrato geológico é mais diferenciado e de características ligeiramente mais ácidas na Ilha do Porto Santo e os valores das variáveis geogénicas bem como da concentração do gás radão no ar interior mostram analogia nos parâmetros de tendência central bem como no padrão de variação.

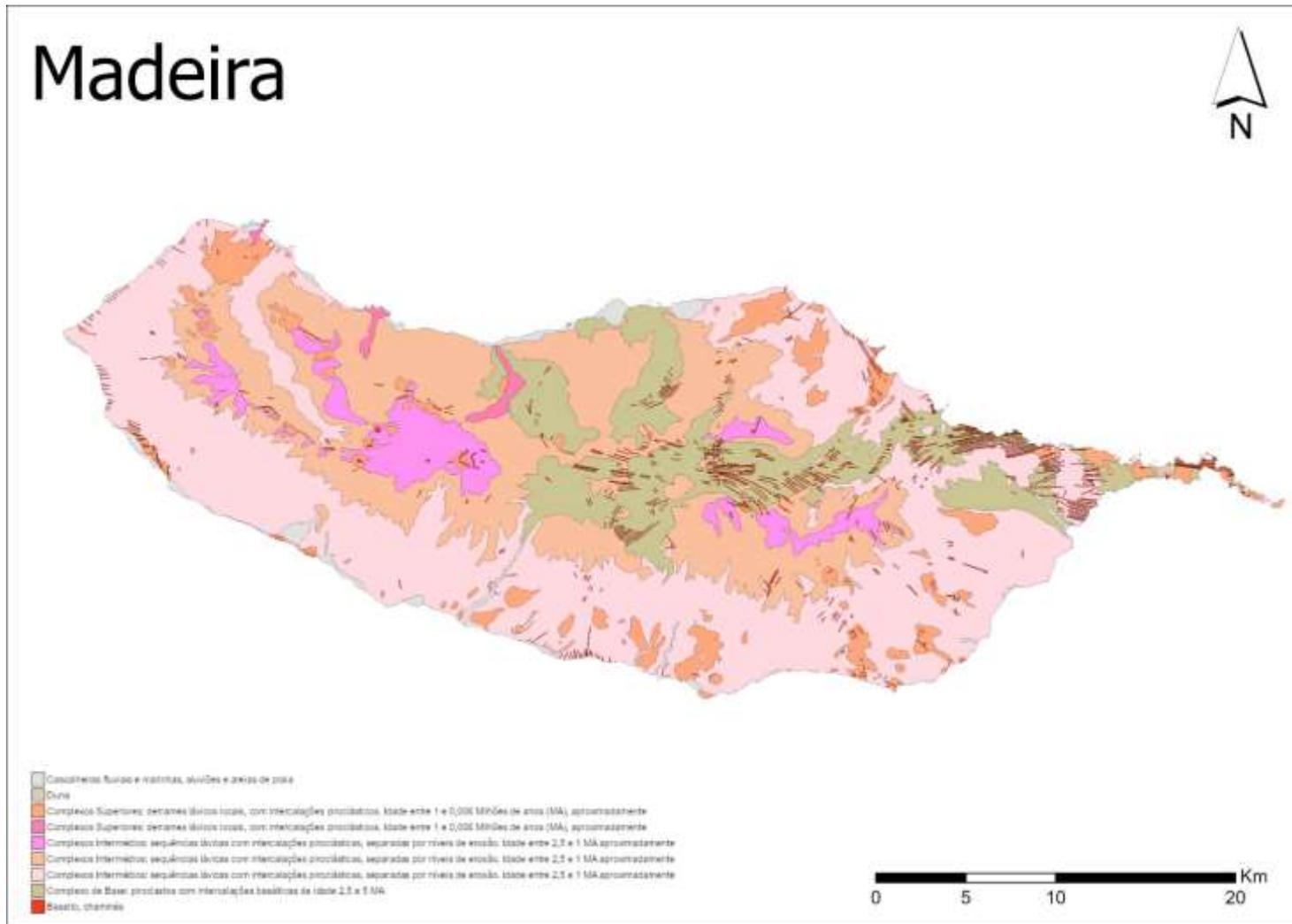
Na modelação do risco de exposição ao gás radão optou-se pela aplicação da mesma metodologia seguida em trabalhos similares no território continental, ou seja, num método assente numa classificação binária, suportada na análise da curva característica de operação do recetor (do inglês “*Receiver Operating Characteristic Curve*”, ROC). O conjunto da informação disponível foi utilizado na metodologia proposta, usando as variáveis geogénicas como preditores da concentração do gás no interior das habitações, os valores obtidos e referentes a este último parâmetro para efeitos de validação, tendo sido definido um índice de risco para cada uma das unidades geológicas aflorantes nas ilhas da Madeira e Porto Santo. Este índice avalia o risco de ocorrência de pelo menos 10 % das habitações numa determinada área geográfica terem registo de concentração do gás radão superior ao nível de referência de 300 Bq/m³. Os resultados da modelação apontam para um quadro idêntico em ambas as ilhas, ou seja, uma situação generalizada de risco de exposição ao gás radão baixo.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

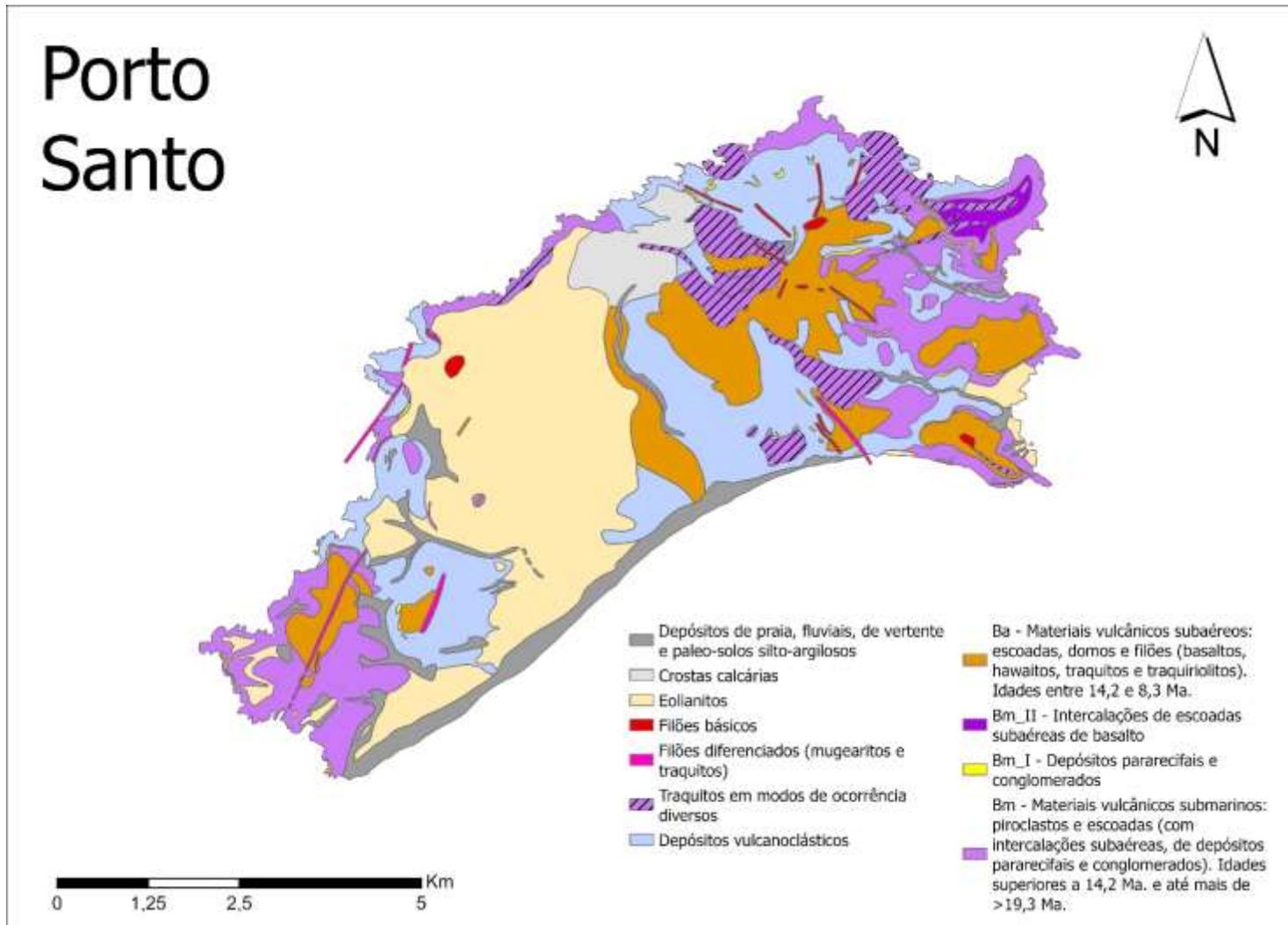
- Bossew, P. (2014). Determination of radon prone areas by optimized binary classification. *Journal of Environmental Radioactivity*, 129, 121–132.
- Domingos, F., Sêco, S., Luis, G., Pereira, A. (2021). Monitorização da atividade de radão no interior de edifícios em Portugal Continental: Avaliação de Risco. *Laboratório de Radioatividade Natural, Universidade de Coimbra*, 57 p.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, no. 8, p. 861–874. DOI 10.1016/j.patrec.2005.10.010.
- Geldmacher, J., Hoernle, K. (2000). The 72 Ma geochemical evolution of the Madeira hotspot (eastern North Atlantic): recycling of Paleozoic (≤ 500 Ma) oceanic lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(1), 73–92. doi:10.1016/S0012-821X(00)00266-1.
- Mata, J., Kerrich, R., MacRae, N.D., Wu, W.T. (2000). Elemental and isotopic (Sr, Nd, and Pb) characteristics of Madeira Island basalts: evidence for a composite HIMU – EM I plume fertilizing lithosphere. *Can. J. Earth Sci.* 35: 980–997.
- LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), 2009. *Carta Geológica Simplificada das Ilhas da Madeira e do Porto Santo, na escala 1:80 000*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Unidade de Geologia, Hidrogeologia e Geologia Costeira.
- LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), 1996. *Carta Geológica da ilha de Porto Santo, à escala 1:25 000*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Unidade de Geologia, Hidrogeologia e Geologia Costeira.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 150-A/2022. *Diário da República n.º 232/2018, Série I de 2018-12-03, páginas 5490 - 5543*. Presidência do Conselho de Ministros, Lisboa.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2010). *Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, vol. I, United Nations*, p. 683.

11. ANEXO A – CARTOGRAFIA GEOLÓGICA ADOTADA

11.1. A.1 – Carta Geológica simplificada da Madeira à escala 1:80 000 (LNEG, 2009)



11.2. A.2 – Carta Geológica adaptada de Porto Santo à escala 1:80 000 (LNEG, 1996; 2009)



12. ANEXO B – DADOS EM BRUTO

Esta seção foi removida da versão pública deste relatório em conformidade com o Regulamento Geral de Proteção de Dados, de modo a proteger a privacidade dos intervenientes

12.1. B.1 – Dados de radiação externa e das concentrações dos radionuclídeos naturais

Esta seção foi removida da versão pública deste relatório em conformidade com o Regulamento Geral de Proteção de Dados, de modo a proteger a privacidade dos intervenientes

12.2. B.2 – Dados das concentrações de Radão-222 no ar interior de edifícios

Esta seção foi removida da versão pública deste relatório em conformidade com o Regulamento Geral de Proteção de Dados, de modo a proteger a privacidade dos intervenientes

13. ANEXO C – ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE AO GÁS RADÃO POR FREGUESIA

Freguesia	Município	Ilha	Índice de Suscetibilidade
Arco da Calheta	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Calheta	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Estreito da Calheta	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Fajã da Ovelha	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Jardim do Mar	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Paul do Mar	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Ponta do Pargo	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Prazeres	Calheta	Ilha da Madeira	Baixo
Câmara de Lobos	Câmara de Lobos	Ilha da Madeira	Baixo
Curral das Freiras	Câmara de Lobos	Ilha da Madeira	Baixo
Estreito de Câmara de Lobos	Câmara de Lobos	Ilha da Madeira	Baixo
Jardim da Serra	Câmara de Lobos	Ilha da Madeira	Baixo
Quinta Grande	Câmara de Lobos	Ilha da Madeira	Baixo
Funchal (Santa Luzia)	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
Funchal (Santa Maria Maior)	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
Funchal (São Pedro)	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
Funchal (Sé)	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
Imaculado Coração de Maria	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
Monte	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
Santo António	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
São Gonçalo	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
São Martinho	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
São Roque	Funchal	Ilha da Madeira	Baixo
Água de Pena	Machico	Ilha da Madeira	Baixo
Canical	Machico	Ilha da Madeira	Baixo
Machico	Machico	Ilha da Madeira	Baixo
Porto da Cruz	Machico	Ilha da Madeira	Baixo
Santo António da Serra	Machico	Ilha da Madeira	Baixo
Canhas	Ponta do Sol	Ilha da Madeira	Baixo
Madalena do Mar	Ponta do Sol	Ilha da Madeira	Baixo
Ponta do Sol	Ponta do Sol	Ilha da Madeira	Baixo
Achadas da Cruz	Porto Moniz	Ilha da Madeira	Baixo
Porto Moniz	Porto Moniz	Ilha da Madeira	Baixo
Ribeira da Janela	Porto Moniz	Ilha da Madeira	Baixo
Seixal	Porto Moniz	Ilha da Madeira	Baixo
Campanário	Ribeira Brava	Ilha da Madeira	Baixo
Ribeira Brava	Ribeira Brava	Ilha da Madeira	Baixo
Serra de Água	Ribeira Brava	Ilha da Madeira	Baixo
Tabua	Ribeira Brava	Ilha da Madeira	Baixo
Camacha	Santa Cruz	Ilha da Madeira	Baixo

Freguesia	Município	Ilha	Índice de Susceptibilidade
Canico	Santa Cruz	Ilha da Madeira	Baixo
Gaula	Santa Cruz	Ilha da Madeira	Baixo
Santa Cruz	Santa Cruz	Ilha da Madeira	Baixo
Santo António da Serra	Santa Cruz	Ilha da Madeira	Baixo
Arco de São Jorge	Santana	Ilha da Madeira	Baixo
Faial	Santana	Ilha da Madeira	Baixo
Ilha	Santana	Ilha da Madeira	Baixo
Santana	Santana	Ilha da Madeira	Baixo
São Jorge	Santana	Ilha da Madeira	Baixo
São Roque do Faial	Santana	Ilha da Madeira	Baixo
Boaventura	São Vicente	Ilha da Madeira	Baixo
Ponta Delgada	São Vicente	Ilha da Madeira	Baixo
São Vicente	São Vicente	Ilha da Madeira	Baixo
Porto Santo	Porto Santo	Ilha de Porto Santo	Baixo