



UNIVERSIDADE DE  
**COIMBRA**

Gustavo Pereira Santiago Luís

**METODOLOGIAS PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE  
RISCO DO GÁS RADÃO A ESCALAS VARIADAS NA  
REGIÃO DE TONDELA E OLIVEIRA DO HOSPITAL  
(CENTRO DE PORTUGAL)**

**VOLUME 1**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências, com Área de Especialização  
em Recursos Geológicos, orientada pelo Professor Doutor Alcides José Sousa  
Castilho Pereira e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra.**

Outubro de 2020



**METODOLOGIAS PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE  
RISCO DO GÁS RADÃO A ESCALAS VARIADAS NA REGIÃO  
DE TONDELA E OLIVEIRA DO HOSPITAL (CENTRO DE  
PORTUGAL)**

**VOLUME 1**

Gustavo Pereira Santiago Luís

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências, com Área de Especialização  
em Recursos Geológicos, orientada pelo Professor Doutor Alcides José Sousa  
Castilho Pereira e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra.**

Outubro de 2020





## RESUMO

---

A inalação natural do gás radão contribui significativamente para a dose equivalente por exposição do Homem à radiação ionizante, que logo após o tabaco, provoca o maior incremento no risco de cancro do pulmão. A União Europeia encoraja os estados membro a estabelecer um plano de ação com o propósito de mitigar os efeitos do gás radão (Diretiva 2013/59/Euratom de 5 de dezembro de 2013). Os estados membro devem identificar áreas propensas a radão (APR) onde seja expectável que um número significativo de casas exceda o nível de referência nacional ( $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  em Portugal – Decreto-lei n.º 108/2018).

Neste trabalho é proposto um conjunto de métodos e de técnicas, implementados de forma faseada, que permitiram dar uma resposta sustentada aos objetivos propostos, ou seja, mapear as áreas propensas a radão (APR) a diversas escalas, mas com maior incidência a nível municipal (1:25 000 a 1:1 000). Para o efeito, foram estudadas duas regiões do centro de Portugal (Tondela e Oliveira do Hospital), onde afloram essencialmente litótipos graníticos (Granito das Beiras), maioritariamente biotíticos e porfiroides, e metassedimentos do Grupo das Beiras (Supergrupo Dúrico-Beirão), maioritariamente em encraves, mas também de contacto. Uma densa e intensa fracturação é também característica das áreas de estudo.

Foram usados dados disponíveis em ambas as regiões, para além da cartografia geológica, relativos aos teores dos elementos radiogénicos em rochas, aos fluxos de radiação gama total emitida pelas rochas e solos, à concentração de atividade dos gás radão nos solos bem como na atmosfera interior das habitações. Os planos de amostragem para obtenção de dados para as diversas variáveis são bastante heterogéneos o que obrigou a adaptar as metodologias a esta circunstância.

Na região de Tondela foi efetuada uma análise geoespacial, com interpolação por kriging ordinário, aos dados da radiação gama disponíveis à escala regional, tendo-se extraído as seguintes conclusões: a) existe um controlo litológico; b) existe um claro controlo estrutural das anomalias pelas estruturas orientadas segundo N35°E e pela interseção desta família com outras (N75°E e N55°E); c) a correlação entre pares de pontos mantém-se por maiores distâncias segundo a orientação N35°E, condizente com a orientação estrutural acima mencionada. Na base dos dados de radiação gama obtidos à escala local em setores selecionados em Oliveira do Hospital foi efetuada uma simulação prévia dos valores de fundo radiológico à escala regional. Os resultados para esta área condizem com a estruturação identificada em Tondela.

Os dados, quer de elementos radiogénicos, quer das concentrações de atividade de radão nos solos, suportaram a relação entre o sinal obtido nas campanhas de radiação gama total e o radão naturalmente disponível para migrar para o interior das habitações. Esta

relação válida a utilização da radiação  $\gamma$  total como variável *proxy* para a análise da curva Característica de Operação do Recetor (ROC), com o objetivo de mapear APRs.

Considerando que uma APR é definida por uma probabilidade superior a 10% de encontrar uma habitação com concentrações acima dos  $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , todas as áreas foram classificadas como APRs. Na região de Tondela, a área de menor risco representa uma probabilidade de 25% das casas superarem o nível de referência nacional e a área de maior risco, classificada como APR de probabilidade elevada, representa uma probabilidade de 52%. Na região de Oliveira do Hospital com maior risco radiológico, a quase totalidade da área é classificada como APR de probabilidade elevada, com 56% de probabilidade de exceder o nível de referência. Na restante área, espacialmente restrita às zonas de maior densidade de anomalias, 78% das habitações excedem o nível de referência e é classificada como APR de probabilidade muito elevada.

A utilização da radiação  $\gamma$  total, no contexto geológico mencionado, revelou-se adequada para o mapeamento de risco radiológico, associado ao radão, e a análise da curva ROC, tal como aplicada neste estudo, é uma ferramenta estatística que permitiu classificar significativamente áreas de maior e menor risco, dentro do risco elevado, evidenciando a variabilidade a menor escala.

**Palavras-chave:** *radiação natural, radão, mapas de risco, análise ROC*

## ABSTRACT

---

Inhalation of radon gas exposes the human body to ionizing radiation which significantly contributes to the equivalent dose received. After tobacco, it is the major contributor to lung cancer risk. European Union advises member states to establish a national action plan for radon to mitigate this risk (Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013). The member-states must identify radon prone areas (RPA), characterized by a significant percentage of dwellings above the national reference level ( $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  in Portugal – Decreto-lei n.º 108/2018).

This dissertation aims to propose methods and techniques, applied case-by-case, to map RPAs at a small-scale (1:25 000 to 1:1 000). The case-study areas are in the center of Portugal (Tondela and Oliveira do Hospital) where outcrop different granites (Beiras Granite), especially coarse-grained biotite granites, and metasediments of Beira's Group (Dúrico-Beirão Supergroup), frequently as enclaves hosted in the granites mentioned. An intense network of faults is also characteristic of these regions.

Data used implied a collection and organization of available datasets from different sources, namely: different geological maps; content of radiogenic elements on rocks; data of total gamma radiation fluxes emitted by rocks and soils; the activity concentration of radon gas on soils; and also the activity concentration of radon gas in dwellings. The sampling methods and scales for these variables vary across sources which implies the adaptation of methods to this circumstance.

At Tondela area the geospatial analysis and ordinary kriging interpolation of total gamma radiation, on a regional scale, raised the following conclusions: a) there is a geological control on this variable; b) there is a clear structural control on anomalies by N35°W orientated faults, but also by the intersection of these structures with others, namely N75°E and N55°E orientated; c) the correlation of equally spaced points persist by longer distances on an N35°E orientation, which is consistent with structural orientation mentioned above. At Oliveira do Hospital, based on local scale high definition data, we simulated the radiological background of total gamma radiation at a regional scale and the obtained results are consistent with the structural control pattern identified at Tondela region.

Data of radiogenic elements and radon concentration in soils support the relationship of total gamma radiation signal and the radon gas naturally available in soils to migrate into dwellings, which validates the use of total gamma radiation as a proxy variable for Receiver Operator Characteristic (ROC) analysis to aim the classification of RPAs.

Establishing a 10% probability of dwellings with concentrations of radon above reference level ( $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) to define a RPA, all the areas were classified as RPAs. At

Tondela region, the lowest risk area represents a 25% probability of exceeding the reference level and the highest risk area (RPA – high probability) represents a 52% exceedance probability. At Oliveira do Hospital, which represents a region of higher radiological risk, almost the entire region represents a 56% probability of exceeding the reference level and is classified as RPA – high probability. Spatially related to intense anomalies there are areas with 78% of exceedance probability and are classified as RPA – very high probability.

For a geological context like the studied areas, the use of total gamma radiation proved to be suitable for radiological risk mapping associated with radon gas. The ROC curve analysis, as applied in this study, is a statistical tool that significantly classified higher and lower risk areas within high-risk regions, which consider the small-scale variability.

**Keywords:** *natural radiation, radon, risk maps, ROC analysis*

## AGRADECIMENTOS

---

A dissertação para a obtenção de grau Mestre, que aqui se encontra materializada, não é apenas reflexo do trabalho que desenvolvi neste último ano. É também o culminar de uma série de acontecimentos e pessoas. Sob pena de nunca mais vir a ter a oportunidade de os expressar publicamente e eternizá-los, endereço aqui os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira, professor catedrático da Universidade de Coimbra, Diretor do Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra e orientador desta dissertação, agradeço pela orientação científica fundamental, sem a qual esta dissertação não seria possível, pela partilha do seu conhecimento e pela abertura a novas ideias e debate constante das mesmas.

Ao Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra enquanto instituição, através do Professor Doutor Alcides Pereira, pela oportunidade que me foi dada de trabalhar e investigar, em sincronia com a elaboração desta dissertação, através de uma bolsa de investigação, na minha área de interesse: a radioatividade. Ao meu colega de laboratório, com quem dividi grande parte do meu tempo neste último ano, José Carvalho, mestre em geociências, que me ensinou da melhor forma todas as técnicas laboratoriais de que o laboratório dispõe. Ao meu colega de laboratório, Sérgio Sêco, doutorado em geologia, que partilhou comigo muito da sua experiência e me ensinou as técnicas de campo.

Aos meus amigos, José Augusto Filho, Rafael Correia e Ricardo Marques. Com quem, para além do apoio incondicional na vida pessoal, na vida académica tive o prazer de estimular simbioticamente o pensamento crítico, com debates de ideias constantes.

À minha família pelo apoio incondicional. Aos meus pais, que dentro das suas possibilidades me proporcionaram as condições para eu percorrer este percurso. À minha mãe, por se ter sacrificado e trabalhado muito mais do que o normal, proporcionando assim a estabilidade da qual usufruí. Ao meu pai pela preocupação, pelos conhecimentos e sobretudo pelo orgulho que depositou em mim. À minha irmã, por nada em especial, mas por tudo. Como irmã mais velha que sempre se preocupou e quem me disse para dar uma oportunidade à geologia.

Aos meus amigos de longa data, nomeadamente da minha terra natal, Ceira, que apesar do distanciamento provocado pelos nossos percursos, continuam incondicionalmente disponíveis.

À Beatriz Almeida, minha namorada e mestre em psicologia, que sempre me ajudou a não sofrer com a síndrome do impostor. Quem mais me aturou na hora de ouvir falar sobre radioatividade e geologia, mesmo sem entender nada do que eu dizia. Fora claro, todo o apoio incondicional na vida pessoal.

A todos, um enorme obrigado.



# Índice

---

Índice de figuras .....	III
Índice de tabelas .....	VII
Abreviaturas .....	X
1. Introdução .....	1
1.1 Propriedades físico-químicas do gás Radão .....	5
1.2 Fatores que condicionam as concentrações de radão em habitações .....	7
1.2.1 Fluxo de entrada do gás na habitação .....	8
1.2.1.1 Solos e rochas .....	8
1.2.1.2 Produtos e bens essenciais .....	13
1.2.1.3 Materiais de construção .....	13
1.2.1.4 Ar exterior .....	14
1.2.2 Fluxo de saída do gás da habitação .....	14
1.3 Modelos de concentração de radão em habitações .....	18
2. O mapeamento da radiação natural .....	20
2.1 Síntese de metodologias .....	25
2.1.1 Espanha .....	26
2.1.2 Reino Unido .....	26
2.1.3 Alemanha .....	26
2.1.4 Canadá .....	27
2.1.5 França .....	28
3. Enquadramento das áreas de estudo .....	31
4. Dados, métodos e técnicas .....	42
4.1 Dados disponibilizados .....	42
4.1.1 Radiação gama total .....	42
4.1.2 Elementos radiogénicos .....	44
4.1.3 Concentrações de atividade de radão no solo .....	45
4.1.4 Concentrações de atividade de radão no interior de habitações .....	46
4.2 Métodos e técnicas aplicados aos dados disponibilizados .....	47
4.2.1 Análise de dados e testes estatísticos de significância .....	47
4.2.1.1 Simulação do fundo regional de radiação gama total para a região de Oliveira do Hospital .....	50

4.2.2	Análise geoespacial e interpolação.....	51
4.2.2.1	Kriging Ordinário (KO) .....	51
4.2.3	Análise da curva Característica de Operação do Recetor (ROC)...	55
5.	Resultados obtidos.....	61
5.1	Radiação gama total.....	61
5.1.1	Tondela .....	61
5.1.2	Oliveira do Hospital.....	66
5.2	Elementos radiogénicos.....	69
5.2.1	Tondela .....	69
5.3	Concentrações de atividade de radão no solo .....	72
5.3.1	Tondela .....	72
5.3.2	Oliveira do Hospital.....	74
5.4	Concentrações de atividade de radão no interior de habitações.....	76
5.4.1	Tondela .....	76
5.4.2	Oliveira do Hospital.....	77
5.5	Simulação do fundo regional de radiação gama total para a região de Oliveira do Hospital.....	78
5.6	Análise geoespacial e interpolação.....	82
5.6.1	Radiação gama total.....	82
5.6.1.1	Tondela .....	82
5.6.1.2	Oliveira do Hospital.....	85
5.6.2	Concentração de atividade de radão nos solos .....	93
5.6.2.1	Oliveira do Hospital.....	93
5.7	Análise da curva Característica de Operação do Recetor .....	95
5.7.1	Região de Tondela .....	95
5.7.2	Oliveira do Hospital.....	98
6.	Discussão dos resultados obtidos .....	102
6.1	Radiação gama total e concentração de atividade de radão no solo.....	102
6.2	Análise da curva Característica de Operação do Recetor e mapas de áreas propensas a radão.....	111
7.	Conclusões e trabalhos futuros .....	115
8.	Referências.....	119



# Índice de figuras

---

Figura 1 – Risco absoluto de morte por cancro do pulmão aos 75 anos em função das concentrações de radão observadas em habitações. ....	4
Figura 2 – Risco relativo de cancro do pulmão, em relação a um não fumador sem qualquer exposição ao gás-radão (risco relativo de valor 1), em função das concentrações de radão observadas em habitações. ....	4
Figura 3 – Risco relativo de cancro do pulmão, considerado separadamente para fumadores, ex-fumadores e não fumadores, em função das concentrações de gás radão nas habitações. ....	4
Figura 4 - Cadeia de decaimento do Urânio. ....	7
Figura 5 – Variação de valores de permeabilidade, típicos de rochas e solos. ....	11
Figura 6 - Esquema ilustrativo de processos genéticos e de transporte de gás radão.....	17
Figura 7 - Esquema síntese de definições utilizadas em proteção radiológica ambiental, as suas relações e metodologias possíveis de aplicar no seu mapeamento. ....	30
Figura 8 - Granitóides variscos no Centro e Norte de Portugal e esquema geológico simplificado do Batólito das Beiras. ....	33
Figura 9 - Evolução tectono-magmática do Batólito das Beiras durante a orogenia varisca. ....	34
Figura 10 – Cartografia geológica elaborada à escala 1:25 000, para as áreas em estudo. ....	37
Figura 11 – Cartografia dos encraves metassedimentares e da estrutura mineralizada para os sectores A, B e C, elaborada a uma escala 1:2 000.....	38
Figura 12 - Histograma (esquerda) e gráfico quantil-quantil (direita). da transformação logarítmica dos dados de radiação gama, para a região de Tondela .....	61
Figura 13 - Histogramas (esquerda) dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em $\log(\text{cps})$ ), em função da geologia, para a região de Tondela.....	62
Figura 14 - Diagrama de caixas dos dados de radiação gama total, para a região de Tondela. ....	63
Figura 15 – Diagrama de caixas e histogramas dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em $\log(\text{cps})$ ), em função da geologia à escala regional, para a região de Oliveira do Hospital.....	67
Figura 16 – Diagrama de caixas e histogramas dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em $\log(\text{cps})$ ), em função da geologia à escala de pormenor, para a região de Oliveira do Hospital.....	68

Figura 17 – Diagrama de caixas e histogramas dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em $\log(\text{cps})$ ), em função da geologia à escala regional e de pormenor, para a região de Oliveira do Hospital.....	68
Figura 18 - Diagramas de caixas dos dados de elementos radiogénicos em amostras de rocha, em função da litologia, para a região de Tondela. A laranja dados de concentração de U, a azul dados de concentração de Th e a amarelo dados de concentração de atividade de $^{40}\text{K}$ , por quilograma de amostra. Eixos verticais em escalas logarítmicas.....	70
Figura 19 - Histograma (esquerda) dos dados de concentração de atividade de radão nos solos e gráfico quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica de concentração de atividade de radão nos solos (eixo vertical em $\log(k\text{Bq} \cdot \text{m} - 3)$ ), para a região de Tondela. ....	72
Figura 20 - Diagrama de caixas dos dados de de concentração de atividade de radão nos solos, para a região de Tondela.....	72
Figura 21 - Gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica de concentração de atividade de radão nos solos (eixo vertical em $\log(k\text{Bq} \cdot \text{m} - 3)$ ), para a região de Tondela. ....	73
Figura 22 - Histogramas dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função da litologia, para a região de Tondela .....	74
Figura 23 – Diagrama de caixas, à esquerda, dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função da litologia. Gráficos quantil-quantil, à direita, da transformação logarítmica de concentração de atividade de radão nos solos (eixo vertical em $\log(k\text{Bq} \cdot \text{m} - 3)$ ), para a região de Oliveira do Hospital. ....	75
Figura 24 - Histograma (esquerda) dos dados de concentração de atividade de radão em habitações e gráfico quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica dos dados de concentração de radão em habitações (eixo vertical em $\log(\text{Bq} \cdot \text{m} - 3)$ ), para a região de Tondela.....	76
Figura 25 – Diagrama de caixas de concentrações de atividade de radão em habitações, por litologias, para a região de Tondela. ....	77
Figura 26 - Histograma (esquerda) dos dados de concentração de atividade de radão em habitações e gráfico quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica dos dados de concentração de radão em habitações (eixo vertical em $\log(\text{Bq} \cdot \text{m} - 3)$ ), para a região de Oliveira do Hospital.....	78
Figura 27 – Diagrama de caixas dos dados de radiação gama total, em função dos sectores estudados em pormenor, na região de Oliveira do Hospital. SA – sector A; SB – sector B; SC – sector C; .....	79
Figura 28 - Gráfico Q-Q dos dados agrupados dos sectores A, B e C.....	80

Figura 29 – Comparativo entre a distribuição simulada e a distribuição observada, do fundo regional de radiação gama total.....	81
Figura 30 - Tendência regional da radiação gama total. À esquerda a projeção dos pontos amostrados em planos verticais (perpendiculares entre si) com um ângulo de 45 em relação aos eixos de coordenadas dos dados. À direita, esquema da superfície polinomial de grau um, para remoção da tendência regional. ....	82
Figura 31 - Interpolação da radiação gama total (cps) com utilização de apenas valores mínimos. Covariogramas segundo eixos de anisotropia. Gráfico de erro padrão. Mapa de covariância. ....	83
Figura 32 - Interpolação da radiação gama total (cps) com utilização de apenas valores mínimos. Covariogramas segundo eixos de anisotropia. Gráfico de erro padrão. Mapa de covariância. ....	83
Figura 33 - Mapas de covariância para o mesmo conjunto de dados (apenas valores mínimos), mas com lags diferentes. ....	85
Figura 34 - Interpolação da radiação gama total (cps) dos dados regionais e simulação do fundo radiológico. Covariograma e mapa de covariância. ....	86
Figura 35 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) (escala 1:2 000) do sector A – Encrave de Nogueira - e covariograma.....	87
Figura 36 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) de pormenor (escala 1:2 000) e da grelha de aquisição (escala 1:1 000), para o sector B – Senhor das Almas. Covariograma e semivariograma obtidos.....	88
Figura 37 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) de pormenor (escala 1:2 000) e das grelhas de aquisição (escala 1:1 000), para o sector C – Vila da Baguinha. Covariogramas e semivariograma obtidos. ....	89
Figura 38 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) (escala 1:2 000) do sector D – Chão do Prado - e covariograma. ....	90
Figura 39 - Interpolação da radiação gama total (cps) dos dados regionais e de pormenor. Semivariogramas segundo os eixos anisotropia e mapa de semivariância. ....	92
Figura 40 - Interpolação dos dados de concentração de atividade de radão nos solos nos sectores A, B e C e semivariogramas. ....	94
Figura 41 - Gráfico ROC para otimização da classificação da radiação gama total em função do critério definido, na região de Tondela. ....	96
Figura 42 - Mapa de áreas propensas a radão na região de Tondela. A área é considerada como propensa a radão (APR) acima dos 10% de casas acima do nível de referência. A probabilidade elevada, estabelecida nesta dissertação, implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, entre os 30% e os 60%. A probabilidade muito elevada implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, acima dos 60%. ....	96

Figura 43 - Diagramas de caixas das concentrações de elementos radiogénicos, em amostras de rocha, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, da região de Tondela.....	97
Figura 44 - Diagramas de caixas da concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, da região de Tondela. ....	98
Figura 45 - Gráfico ROC para otimização da classificação da radiação gama total em função do critério definido, na região de Oliveira do Hospital. ....	99
Figura 46 - Mapa de áreas propensas a radão na região de Oliveira do Hospital. A área é considerar como propensa a radão (APR) acima dos 10% de casas acima do nível de referência. A probabilidade elevada, estabelecida nesta dissertação, implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, entre os 30% e os 60%. A probabilidade muito elevada implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, acima dos 60%.....	100
Figura 47 - Diagramas de caixas da concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, da região de Oliveira do Hospital.....	101
Figura 48 – Identificação espacial da tendência das anomalias. Mapa da interpolação da radiação gama total (cps) com utilização de apenas valores máximos e gráfico Q-Q dos dados originais.....	104
Figura 49 - Resultado da interpolação da radiação gama total, na região de Tondela.....	109
Figura 50 - Resultado da interpolação da radiação gama total, na região de Oliveira do Hospital.....	110

# Índice de tabelas

---

Tabela 1 - Doses de exposição à radiação ionizante por fonte de radiação. ....	2
Tabela 2 - Valores de emanção e de atividade de Ra para alguns minerais e algumas rochas do estudo de Sakoda et al. (2011). ....	10
Tabela 3 - Contribuição estimada de várias fontes para as concentrações de radão médias observadas. ....	14
Tabela 4 - Esquema síntese dos fatores que influenciam os fluxos de entrada e saída, para cada meio. ....	16
Tabela 5 – Exemplos de definições de Áreas Propensas a Radão (APR) em alguns países europeus. ....	23
Tabela 6 – Esquema de classificação de metodologias em função dos três principais parâmetros a considerar. ....	25
Tabela 7 – Classificação estrutural e geocronológica dos granitoides ibéricos. ....	33
Tabela 8 - Teores médios de Urânio dos litótipos de interesse, apresentados nos estudos de Pereira et al. (2002), Lamas et al. (2015) e Lamas et al. (2017). ....	39
Tabela 9 - Tabela de contingência para registo dos cenários possíveis de um sistema de classificação binário, em função do critério definido. ....	59
Tabela 10 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de radiação gama total (em cps), em função da litologia, e parâmetros calculados do teste de Kruskal-Wallis, para a região de Tondela. ....	65
Tabela 11 - Matriz de valores-p do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney por pares, para a região de Tondela. Ajuste dos valores-p pelo método de Holm. ....	66
Tabela 12 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de radiação gama total (em cps), em função de várias litologias e escala, e parâmetros calculados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney e teste de Kolmogorov-Smirnov, para a região de Oliveira do Hospital. ....	67
Tabela 13 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de elementos radiogénicos em amostras de rocha, em função da litologia, para a região de Tondela. Parâmetros de U e Th em ppm e parâmetros de $^{40}\text{K}$ em $(\text{Bq} \cdot \text{kg} - 1, \text{de amostra})$ . ....	70
Tabela 15 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos (em $\text{kBq} \cdot \text{m} - 3$ ), em função da litologia, e parâmetros calculados para o teste de Kruskal-Wallis, para a região de Tondela. ....	73
Tabela 15 - Matriz de valores-p do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney por pares, para a região de Tondela. Valores-p sem ajuste para comparações múltiplas. ....	74

Tabela 16 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos (em $kBq \cdot m^{-3}$ ), em função da litologia, e parâmetros calculados para o teste Wilcoxon-Mann-Whitney, para a região de Oliveira do Hospital.....	75
Tabela 17 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão em habitações (em $Bq \cdot m^{-3}$ ), em função da litologia, para a região de Tondela.....	76
Tabela 18 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão em habitações (em $Bq \cdot m^{-3}$ ), em função do andar, e parâmetros calculados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, para a região de Oliveira do Hospital.....	78
Tabela 19 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de radiação gama total (em cps), necessários para a simulação do fundo regional de radiação gama total de Oliveira do Hospital, e parâmetros calculados do teste de Kruskal-Wallis. ....	80
Tabela 20 – Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário, na região de Tondela.....	84
Tabela 21 - Resultados da validação cruzada dos modelos criados, na região de Tondela.	84
Tabela 22 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário aos dados regionais, na região de Oliveira do Hospital. ....	86
Tabela 23 - Resultados da validação cruzada do modelo criado, dos dados regionais, na região de Oliveira do Hospital. ....	86
Tabela 24 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário e resultados da validação cruzada dos modelos de radiação gama total (cps) criados, para os dados dos sectores de pormenor e grelhas de aquisição, na região de Oliveira do Hospital.....	91
Tabela 25 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário aos dados regionais e de pormenor, na região de Oliveira do Hospital. ....	92
Tabela 26 - Resultados da validação cruzada do modelo criado, dos dados regionais e de pormenor, na região de Oliveira do Hospital. ....	92
Tabela 27 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário e resultados da validação cruzada dos modelos, para os dados de concentração de atividade de radão nos solos, na região de Oliveira do Hospital. ....	93
Tabela 28 - Parâmetros calculados da tabela de contingência, para análise ROC, na região de Tondela, relativos aos dois limites mais robustos.....	96
Tabela 29 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de elementos radiogénicos em amostras de rocha, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, para a região de Tondela. Resultado do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney à comparação da distribuição das duas classes binárias, para as duas variáveis.....	97
Tabela 30 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, para a região de	

Tondela. Resultado do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney à comparação da distribuição das duas classes binárias.....	98
Tabela 31 - Parâmetros calculados da tabela de contingência, para análise ROC, na região de Oliveira do Hospital, relativos aos dois limites mais robustos.....	99
Tabela 32 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, para a região de Oliveira do Hospital. Resultado do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney à comparação da distribuição das duas classes binárias. ....	101
Tabela 33 – Proposta de classificação uniformizada para as duas áreas de estudo, em função das probabilidades pós-teste, provenientes de dois sistemas de classificação binária distintos. ....	101

## ABREVIATURAS

---

ACC – Exatidão  
AGPR - Área Geologicamente Propensa a Radão  
BSS – Basic Safety Standards  
CE – Coeficiente de emanção  
CXG – Complexo Xisto-Grauváquico  
DEP – Depósitos sedimentares  
EU – European Union  
FG – Filão granítico  
GOH - Granito de Oliveira do Hospital  
GT - Granito de Tondela  
GTB - Granito de Tábua  
GV - Granito da Várzea  
IAEA - International Atomic Energy Agency  
IARC - International Agency for Research on Cancer  
IQR – Intervalo inter-quartil  
MAPR – Mapa de Áreas Propensas a Radão  
MCC – Coeficiente de correlação de Mathews  
MPGR – Mapa de Potencial Geogénico de Radão  
MPR - Mapa de Potencial de Radão  
MRH – Mapa de Radão em Habitações  
MRR – Mapa de Risco de Radão  
APR – Área Propensa a Radão  
PGR – Potencial Geogénico de Radão  
PR – Potencial de Radão  
Q-Q – Quantil-Quantil  
REM-JRC – Grupo Radioactivity Environmental Monitoring do Joint Research Centre  
+RV – Rácio de verossemelhança positiva  
-RV – Rácio de verossemelhança negativa  
TFO – Taxa de falsa omissão  
TFP – Taxa de falsos positivos  
TVP – Taxa de verdadeiros positivos  
UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation  
VPN – Valor preditivo negativo  
VPP – Valor preditivo positivo  
WHO – World Health Organization  
ZCI – Zona Centro-Ibérica







## I. INTRODUÇÃO

---

O corpo humano encontra-se constantemente sujeito a radiação ionizante. Este tipo de radiação é entendido como uma partícula em movimento ou onda eletromagnética, com energia suficiente para remover um elétron de um átomo, ionizando-o. Após a descoberta da radioatividade por Henri Becquerel e após outros trabalhos incontornáveis da física nuclear, como os de Röntgen, Rutherford, ou do casal Curie (entre muitos outros), consegue-se hoje manipular a radiação em prol dos interesses humanos. Parte da exposição humana à radiação ionizante é então de origem artificial, como procedimentos médicos, produção de eletricidade, acidentes nucleares, armamento nuclear ou exposições associadas ao local de trabalho. No entanto, a maior percentagem de exposição a radiação ionizante é de origem natural. Nas fontes sem intervenção direta do ser humano inclui-se a radiação cósmica, a ingestão de qualquer produto, a radiação terrestre e o gás radão. A inalação deste gás é, das fontes naturais e não naturais, a que mais contribui para a dose equivalente média anual de radiação ionizante, contribuindo com 1,26 mSv (tabela 1) (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2008).

Embora o fundo natural de radiação ionizante seja naturalmente dependente da distribuição espacial de radionuclídeos, o fator humano desempenha um papel preponderante nas exposições a que se encontra sujeito. O complexo habitacional e a sua variabilidade é um bom exemplo de tal condicionamento. As habitações servem de barreira à radiação externa, proveniente dos solos e rochas, com eficácia distinta. Em simultâneo, não permitem o escape natural do gás radão, também ele proveniente dos solos e das rochas, acumulando-o. Os materiais de construção também podem conter uma quantidade variável de radionuclídeos (UNSCEAR, 2008). Os hábitos de vida e de ocupação também influenciam as doses a que a pessoa se encontra sujeita. Esta multi-variabilidade induz uma variabilidade à escala local podendo a situação radiológica ser muito diferente em duas casas adjacentes, apesar de partilharem o mesmo contexto de fundo radiológico. Este é um sistema complexo e dinâmico e por isso difícil de prever.

Só por volta da década de 50 do século passado é que se começou a reconhecer um padrão de elevadas taxas de incidência de cancro do pulmão entre mineiros, especialmente em explorações de Urânio, nos Estados Unidos da América. Só após esta consciencialização é que se começaram a rever registos de exposição e se verificou uma relação entre os casos de cancro pulmonar e a exposição ao gás radão. Atualmente acredita-se que os registos históricos de elevada mortalidade de mineiros, já do século XVI, se poderiam atribuir ao radão.

Face a este conhecimento, as primeiras reabilitações de habitações, no contexto de radioatividade ambiental, foram realizadas nas áreas circundantes de explorações mineiras, como por exemplo Grand Junction, Colorado (Estados Unidos da América), Port Hope, Uranium City, Elliot Lake e Bancroft (Canadá) (Nero et al., 1990).

Tabela 1 - Doses efetivas de exposição à radiação ionizante por fonte de radiação. Retirado e adaptado de UNSCEAR (2008)

Fontes de exposição naturais	Dose média anual (mundial)		Variabilidade (mSv)	Observações
	mSv	%		
Inalação do gás radão	1,26	41,55	0,2 - 10	Grande variabilidade de casa para casa.
Radiação externa terrestre	0,48	15,83	0,3 - 1	Variabilidade associada ao contexto geológico.
Ingestão de produtos	0,29	9,56	0,2 - 1	
Radiação cósmica	0,39	12,86	0,3 -1	Aumenta a dose recebida com o aumento da altitude.
	<b>2,42</b>	<b>79,81</b>		
Fontes de exposição artificiais	mSv	%		
Diagnósticos médicos	0,6	19,79	0 - várias dezenas	Não são incluídas as doses (muito mais elevadas) de terapias médicas.
Testes de armamento nuclear	0,005	0,16		Perto dos locais de teste podem ocorrer doses mais altas. O maior pico de dose foi de 0,11 mSv em 1963.
Exposição ocupacional	0,005	0,16	0-20	A dose média real é de 0,7 mSv. Mineiros estão sujeitos a um ambiente muito rico em gás radão, pelo que este pequeno grupo de trabalhadores faz com que a média ocupacional suba muito, considerando-se então uma média mundial mais baixa.
Acidente de Chernobyl	0,002	0,07		Em 1986, a dose média atingida no hemisfério norte foi de 0,04 mSv. A tiróide esteve sujeita a doses muito mais altas. Estima-se que cerca de 300 000 trabalhadores da recuperação do acidente estiveram sujeitos a uma dose média de 150 mSv. Outras 350 000 pessoas receberam doses superiores a 10 mSv.
Centrais nucleares	0,0002	0,01		As doses podem chegar a 0,02 mSv em casos específicos a cerca de 1 km de alguns reatores nucleares.
	<b>0,6122</b>	<b>20,19</b>		

Em 1970 surgiram na Suécia as primeiras evidências de que o risco para a saúde, provocado pelas concentrações de radão, se poderia estender a todo o complexo habitacional. Casas construídas com um agregado de xisto aluminoso rico em rádio, e associadas à melhoria de eficiência energética, possuíam concentrações elevadas de radão no seu interior (Nero et al., 1990). Em 1988, o gás radão e os seus produtos de decaimento foram considerados pela International Agency for Research on Cancer (IARC) (1988) como cancerígenos para os humanos (Grupo I), com evidências suficientes de estudos em animais

e humanos. Todo o sistema respiratório (em especial os pulmões e mais concretamente o epitélio dos brônquios) pode ser afetado por exposição a partículas alfa com origem no decaimento do gás radão inalado, bem como dos seus descendentes, neoformados no interior do sistema ou também eles inspirados, e que acabam por se depositar no sistema respiratório (IARC, 1988; WHO, 2009; Nero et al., 1990). Existem ainda alguns estudos ecológicos recentes, bem como um estudo de coorte, que evidenciam uma relação positiva entre a exposição cumulativa ao gás radão e o desenvolvimento de leucemia (em especial a leucemia linfocítica crónica) (Řeřicha et al., 2006), embora esta ligação não esteja ainda totalmente esclarecida.

O desenvolvimento de um tumor não está diretamente correlacionado com a exposição a radiação ionizante a que o ser humano se encontra sujeito, uma vez que uma única partícula *alfa* é suficiente para provocar dano no DNA (World Health Organization (WHO), 2009), ou seja, qualquer concentração de radão no ar tem o potencial de provocar cancro. No entanto, maiores concentrações de radão têm maior probabilidade de levar ao seu desenvolvimento. Os estudos epidemiológicos, considerados em WHO (2009), corroboram ambas as afirmações. A relação entre a dose e o risco associado é aproximadamente linear e crescente, pelo que existe um incremento de risco significativo, sem indícios da existência de um limite, ainda que para exposições abaixo de qualquer nível de referência. Em Portugal, o nível de referência de 300 Bq/m<sup>3</sup> de concentração de radão no ar é definido no artigo 145.º do *Decreto-lei n.º 108/2018 da Presidência do Conselho de Ministros*, publicado no Diário da República n.º 232/2018, Série I de 2018-12-03. Em média, o risco de desenvolvimento de cancro do pulmão aumenta 10% por cada 100 Bq/m<sup>3</sup> de concentração de radão, mas existem fortes indícios de que este valor seja uma subestimação do valor real, tendo sido demonstrado que o incremento de risco pode atingir os 20% por cada 100 Bq/m<sup>3</sup> (WHO, 2009).

O radão é o segundo maior contribuinte para o cancro do pulmão, logo após o tabaco, e estima-se que seja a causa entre 3 a 14% dos casos (WHO, 2009). Embora o risco associado ao tabaco seja muito superior, é difícil estimar o risco real associado a cada um, uma vez que ambos os fatores interagem de forma multiplicativa para o desenvolvimento de cancro pulmonar (IARC, 1988; Darby et al., 2006). A análise dos dados obtidos em 13 estudos epidemiológicos em Darby et al. (2006) revelou que o risco de desenvolvimento de cancro pulmonar associado ao gás radão é superior para fumadores e ex-fumadores (figura 1), sendo que o risco cumulativo de morte devido a cancro do pulmão, aos 75 anos, para uma pessoa não fumante sujeita a 800 Bq/m<sup>3</sup> é de 0,71%, enquanto para um fumante nas mesmas condições o risco é de 16,81% (figura 2). O mesmo estudo revelou ainda que o risco relativo, considerado separadamente para fumadores, ex-fumadores e não fumadores, associado às concentrações de gás radão em habitações é independente de fumar ou não fumar, mostrando nos três casos uma tendência igual, linearmente crescente (figura 3).

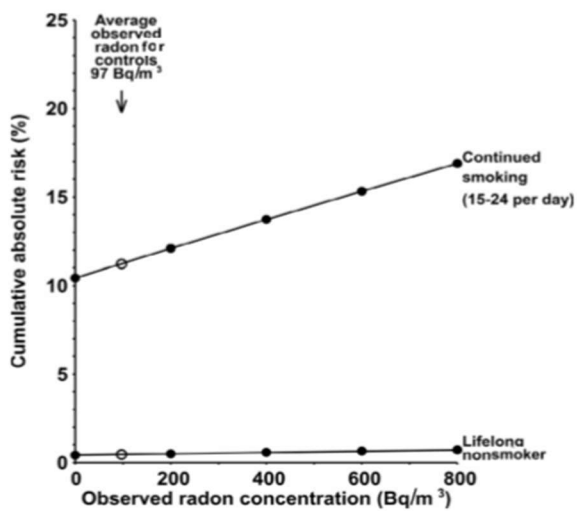


Figura 1 – Risco absoluto de morte por cancro do pulmão aos 75 anos em função das concentrações de radão observadas em habitações. Retirado de Darby et al. (2006).

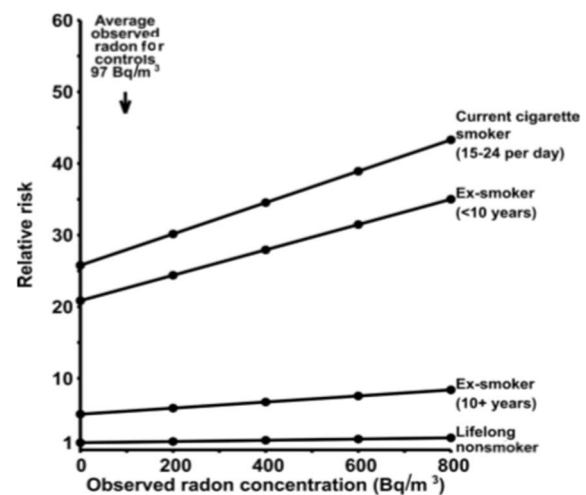


Figura 2 – Risco relativo de cancro do pulmão, em relação a um não fumador sem qualquer exposição ao gás-radão (risco relativo de valor 1), em função das concentrações de radão observadas em habitações. Retirado de Darby et al. (2006).

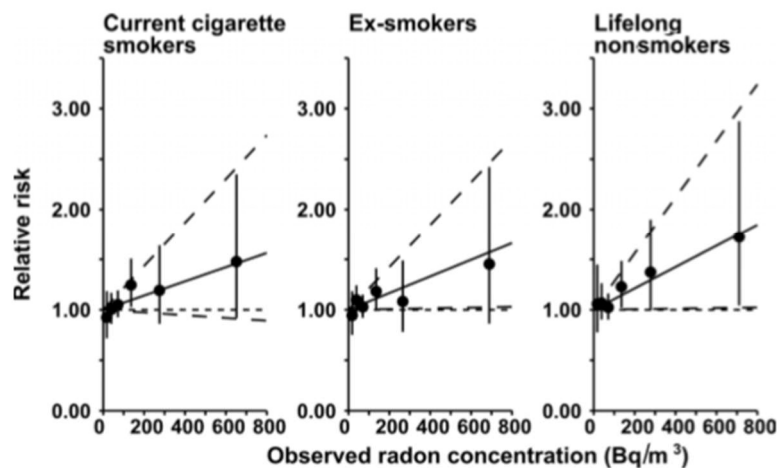


Figura 3 – Risco relativo de cancro do pulmão, considerado separadamente para fumadores, ex-fumadores e não fumadores, em função das concentrações de gás radão nas habitações. O risco relativo calculado e o seu intervalo de confiança de 95% são representados pelas marcas circulares e intervalos verticais respetivamente. A relação linear estimada é representada pela linha contínua e o seu intervalo de confiança de 95% é representado pela linha tracejada. O valor 1 de risco relativo é considerado para uma exposição de 0 Bq/m<sup>3</sup> ao gás radão. Retirado de Darby et al. (2006).

Dado o impacto que o gás radão pode ter para a saúde pública, a Comissão Europeia, através da Diretiva EURATOM – Basic Safety Standards (Council of the European Union (EU), 2013), exige que seja elaborado um plano de ação nacional para o gás radão, mas não especifica metodologias a seguir. Já a Agência Internacional de Energia Atómica (IAEA), através do seu guia “*Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*” (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2015),

estabelece padrões de segurança radiológica a seguir, que são reconhecidos internacionalmente. Ainda assim, muito voltados para o espectro político, no sentido de elaborar um plano de ação nacional.

Independentemente das medidas tomadas, o plano de ação nacional para o gás radão tem de forçosamente incluir uma caracterização radiológica do estado atual do complexo habitacional, bem como uma caracterização que permita prever e reduzir o risco associado ao gás radão. Ambas as caracterizações passam pela elaboração de mapas relacionados. Contudo, do ponto de vista técnico-científico, não existe na atualidade uma metodologia padrão para a elaboração de tais mapas. Os motivos para que nenhuma metodologia reúna o consenso da comunidade científica serão abordados em maior detalhe no capítulo 2. Contudo, os dois maiores entraves são a obtenção dos dados e as incertezas associadas às metodologias. Nesta dissertação proponho-me a explorar estas duas vertentes: 1) com o objetivo de propor um encadeamento de metodologias válido, em função do acervo de dados disponíveis, para rentabilizar os meios disponíveis, e através de metodologias abertas, de modo a beneficiarem do progressivo incremento de dados disponíveis; 2) com o objetivo de realçar e discutir o impacto da escala de trabalho, relacionado diretamente com a incerteza dos modelos, e a importância de elaborar mapas a uma escala apropriada aos limites administrativos mais locais.

Para atingir os objetivos desta dissertação é indispensável a noção de variabilidade a cada uma das diferentes escalas, discutida em 1.3 – Modelos de concentração de radão em habitações, associada à multiplicidade das diferentes variáveis aleatórias independentes, discutidas em 1.2 – Fatores que condicionam as concentrações de radão habitações, que contribuem para a variável dependente e aleatória das concentrações de atividade de radão em habitações. É sobre estas noções de base estatística que assentam os diferentes tipos de mapeamentos e diferentes interpretações dos mesmos, abordado em 2 – O mapeamento da radiação natural, e mais especificamente as metodologias mencionadas em 2.1 – Síntese de metodologias, bem como o encadeamento de análises, métodos e técnicas desenvolvidos nesta dissertação, a partir do capítulo 4, entre os quais se destaca em traços gerais a análise estatística e de significância, a modelação e a interpolação de dados, bem como o desenvolvimento de um sistema de classificação binário de áreas propensas a radão.

## 1.1 Propriedades físico-químicas do gás Radão

O radão (Rn) é o elemento de número atômico 86 da tabela periódica. Com 8 eletrões de valência (o que lhe confere uma elevada estabilidade química), pertence ao designado grupo dos gases nobres. Para além de não reagir com outros elementos químicos, é um

elemento que, às condições normais de pressão e temperatura, não tem cor, não tem cheiro, nem sabor, e por isso é naturalmente indetetável pelo ser humano. É ainda um gás mais denso do que o ar ambiente (9,73 g/L a 0° C), pelo que diminui a sua concentração com a altitude.

Nenhum dos seus isótopos é estável. O  $^{222}\text{Rn}$  é o mais estável (e por isso mais abundante), com um tempo de meia-vida de 3,8 dias, e ocorre na natureza por uma série de decaimentos radioativos, com origem no isótopo mais estável de urânio, o  $^{238}\text{U}$ . Por ser o mais abundante, o nome radão é compartilhado indiscriminadamente entre o isótopo e o elemento. Outro isótopo natural de radão, com muito menor abundância, é o  $^{220}\text{Rn}$ , com um tempo de meia-vida de 55,6 segundos. Tem origem numa série de decaimentos com início no isótopo mais estável de tório, o  $^{232}\text{Th}$ , de onde provém o seu nome torão. O  $^{219}\text{Rn}$  e o  $^{217}\text{Rn}$  também são isótopos naturais de radão, porém com menor significância devido à elevada instabilidade de ambos.

A cadeia de decaimento em que o  $^{222}\text{Rn}$  se insere é conhecida como cadeia de decaimento do Urânio ou do Rádio, ou ainda por série  $4n+2$  (figura 4). Esta última designação representa uma das características da cadeia, em que todos os isótopos que a constituem têm massa atômica ( $A$ ) dada pela expressão  $A = 4n + 2$ . O  $^{238}\text{U}$  ocorre naturalmente nas rochas, onde se pode concentrar em quantidades significativas, devido à sua estabilidade. Embora radioativo, é um dos isótopos com maior tempo de meia-vida que se encontram na natureza, com um tempo de meia-vida de  $4,468 \times 10^9$  anos. Nesta cadeia, é o decaimento *alfa* ( $\alpha$ ) do isótopo  $^{226}\text{Ra}$ , presente nos solos, que dá origem à emissão do isótopo 222 de radão. Na descendência do  $^{222}\text{Rn}$  estão incluídos os principais emissores  $\alpha$ :  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$  e  $^{210}\text{Po}$ , ao qual se segue o término da cadeia de decaimento no isótopo estável  $^{206}\text{Pb}$ . Outros emissores  $\alpha$  podem ocorrer em quantidades insignificantes, devido à probabilidade, embora que reduzida, de alguns isótopos sofrerem diferentes tipos de decaimento.



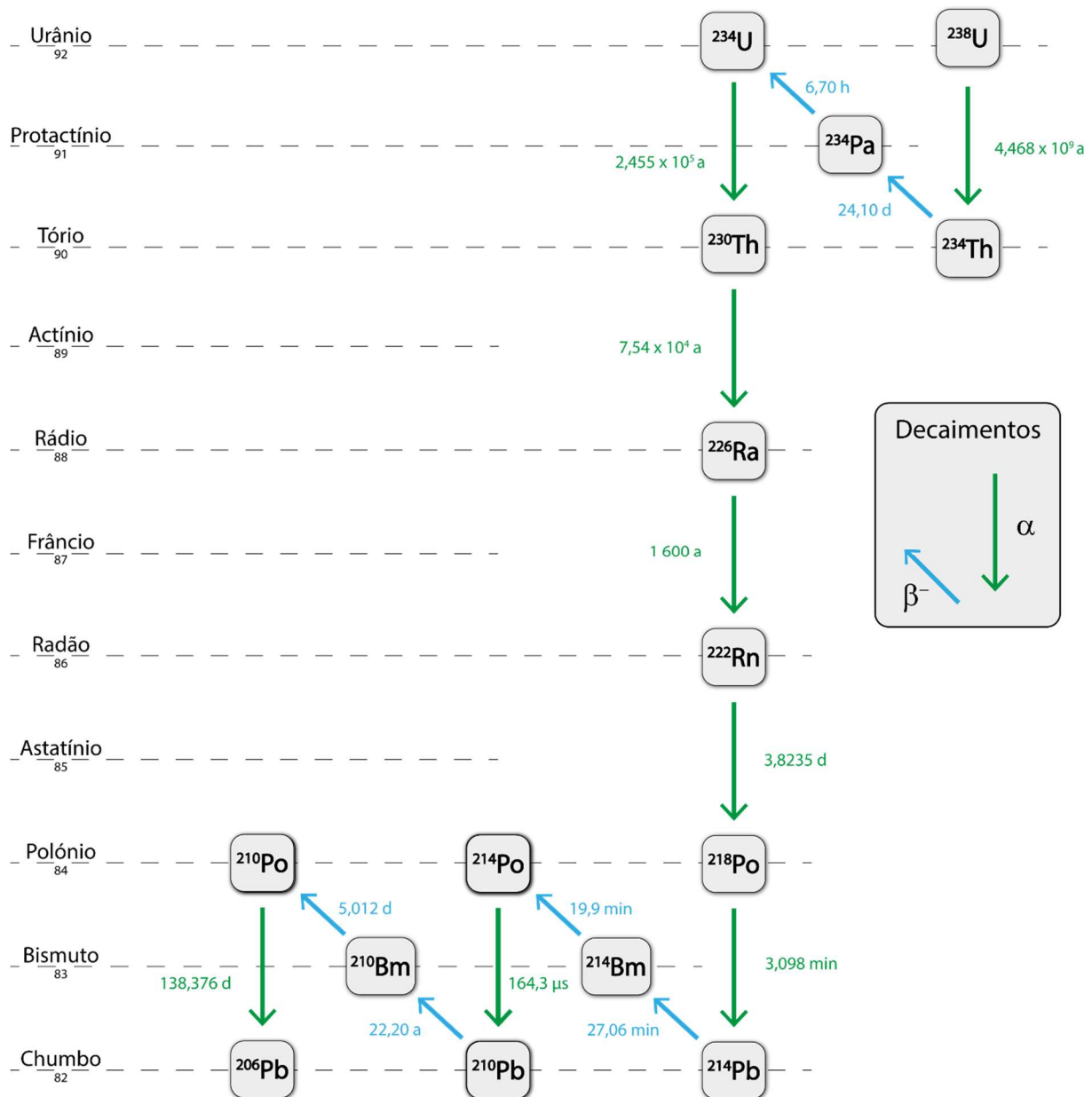


Figura 4 - Cadeia de decaimento do Urânio. Tempos de meia-vida consultados em (International Atomic Energy Agency (IAEA), [s.d.]).

## 1.2 Fatores que condicionam as concentrações de radão em habitações

Por volta do ano 1980 surgiram os primeiros dados e estudos que comprovavam que os solos são a principal fonte contributiva para a acumulação do radão nas habitações (Nero et al., 1990). O principal mecanismo da ascensão do gás é a diferença de pressão, entre o ar no interior da casa e o ar presente nos solos, relacionada com diferenças de temperatura (Nero et al., 1990). Os solos, a pouca profundidade, mantêm-se praticamente a uma temperatura constante. O aumento da temperatura na habitação faz diminuir a densidade do

ar, que tende a ascender. Em simultâneo, ao nível do pavimento, a pressão irá diminuir, devido à ascensão do ar quente, e assim potenciar a ascensão da fração gasosa nos solos. Na situação da casa não ser habitada por longos períodos, a simples diferença de pressão provoca naturalmente a ascensão do gás dos solos (a maior pressão) para o interior da casa (a menor pressão). Em contrapartida, uma ventilação insuficiente faz com que o gás se acumule no interior da habitação.

As concentrações de radão no interior de habitações são regidas pelo balanço entre o fluxo de entrada do gás e o fluxo de saída. Para cada uma destas etapas (entrada e saída) existem muitos fatores que influenciam ou desencadeiam os processos físicos responsáveis pelo transporte do gás radão. Nos subcapítulos subsequentes, é feita uma revisão explicativa destes fatores. Uma tabela síntese é apresentada no final (tabela 4), bem como um modelo conceptual (figura 6).

### *1.2.1 Fluxo de entrada do gás na habitação*

A transferência do gás para o interior da habitação faz-se através de diferentes vias, a seguir explicitadas: a) a partir dos solos e rochas; b) através de produtos e bens essenciais, nomeadamente água e gás-natural; c) dos materiais de construção utilizados na habitação; ou por migração do ar exterior. Sabe-se que os materiais geológicos são os principais contribuintes para o fluxo de entrada; no entanto, as outras três vias, em situações particulares, podem também contribuir de forma significativa.

#### *1.2.1.1 Solos e rochas*

Para uma casa que apresente uma concentração de radão média, apenas cerca de 0,1% do total de radão no solo consegue se infiltrar, contribuindo em média para  $50 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  da concentração de radão em habitações singulares (Nero et al., 1990).

Em geral, assume-se que apenas 0,1% do total de radão no solo é transferido para o interior das habitações (Nero et al., 1990). Este gás tem origem no decaimento radioativo do rádio presente nos solos e rochas. Ambos se inserem em cadeias de decaimento, sendo a mais importante a do Urânio, com início no isótopo  $\text{U}^{238}$ . O material geológico é, portanto, a fonte que desencadeia todo este fenómeno radiológico e ambiental. A distribuição de urânio nas rochas é condicionada pela geoquímica das rochas, pelas estruturas geológicas e pela mobilidade e equilíbrio isotópico. Têm sido levantadas algumas questões relativamente à mobilidade e ao equilíbrio, que indiretamente condicionam a correlação e extrapolação de concentrações de U medidas, principalmente quando a medição é realizada em rochas com baixa alteração (Pereira et al., 2017; Pereira & Neves, 2012; Gomes et al., 2013; Sakoda et al., 2011; Amaral et al., 2012). A uraninite ( $\text{UO}_2$ ), um dos principais minérios de urânio, é

alterada com facilidade por águas meteóricas, que remobilizam o urânio, podendo atingir longas distâncias tendo como ponto de referência a fonte primária do elemento químico (Gomes et al., 2013; Pereira et al., 2017). Quando as condições físico-químicas o permitem o urânio transportado pelas soluções meteórica precipita nos minerais existentes e preenche zonas de fraqueza, como clivagens e fraturas (Neves et al., 1997; Pereira et al., 2002; Sakoda et al., 2011). Nos casos de maior mobilidade, tende a precipitar em matrizes resultantes de ações mecânicas (esmagamento, brechificação, entre outras), como as que integram o núcleo de caixas de falhas, na medida em que estas estruturas facilitam a circulação preferencial de águas (Pereira & Neves, 2012; Pereira et al., 2010; 2002).

De todo o rádio que decai, apenas uma fração do radão escapa do grão para o poro intergranular e fica disponível para migrar. A esta fração dá-se o nome de “fator de emanação” de radão ou “coeficiente de emanação”, que é descrito pela seguinte equação:

$$CE_{Rn} = \frac{Rn_{liberto}}{Rn_{gerado}} \quad (1)$$

$Rn_{liberto}$  – número de átomos de Rn que escapa para os poros

$Rn_{gerado}$  – número de átomos de Ra que decai em Rn

Alguns espectros de valores de emanação, para alguns minerais e algumas rochas, são apresentados na tabela 2. Estes valores foram retirados de Sakoda et al. (2011), onde se podem consultar informações relativas a outros minerais e outras rochas, aqui não incluídas.

Os dois processos responsáveis pela emanação de radão são a difusividade e o alfa *recoil*<sup>1</sup>, que se verifica no átomo de radão. Ambos são muito condicionados pela natureza do material. A difusividade do radão em partículas sólidas tem pouca expressão (consegue apenas percorrer entre  $10^{-13}$  e  $10^{-32}$  metros). Devido ao efeito *recoil*, as partículas de radão podem atingir cerca de 34 nm em grãos de quartzo, 77 nm na água e 53 μm no ar (Sakoda et al., 2011).

---

<sup>1</sup> É difícil de encontrar um termo português para a palavra inglesa *recoil*. Algumas sugestões seriam: “coice” (o mais próximo do significado da palavra, no entanto está intimamente ligado ao recuo de uma arma no momento do disparo), ressaltado ou recuo. Quando um objeto (partícula de Ra) se encontra em repouso e parte desse objeto (partícula alfa emitida) é disparado numa direção, o *recoil* representa o deslocamento em direção oposta do que resta desse objeto (partícula de Rn). Tal deve-se à preservação do momento linear.

Tabela 2 - Valores de emissão e de atividade de Ra para alguns minerais e algumas rochas do estudo de Sakoda et al. (2011).

Minerais	Ra ( $Bq \cdot m^{-3}$ )	E	Rochas	Ra ( $Bq \cdot m^{-3}$ )	E
<b>Apatite</b>	95 - 250	0,005 - 0,25	<b>Xisto aluminoso</b>	443 – 5600	0,011 - 0,35
<b>Monazite</b>	6 667 – 22 333	0,0002 - 0,15	<b>Granito</b>	-	0,038 - 0,404
<b>Moscovite</b> (retirada de um gneiss granítico)	11 940	< 0,015	<b>Gneiss granítico</b>	6 580 – 7 064	0,021 - 0,026
<b>Quartzo</b> (retirado de um gneiss granítico)	800	0,046			
<b>Torite</b>	104 383	0,0538	<b>Granodiorito</b>	-	0,039 - 0,400
<b>Uraninite</b>	5 829 000 – 6 550 000	0,005 - 0,019			
<b>Zircão</b>	3 831 - 50 133	0,0001 - 0,121			

A distribuição do rádio no grão influencia o fator de emissão. Os modelos que consideram uma distribuição do Ra concentrado na superfície granular obtêm resultados mais próximos dos experimentais (Sakoda et al., 2011). Outro fator importante, que os modelos propostos não consideram, é a influência da anisotropia do grão, mas que é demonstrada pelos dados experimentais (Pereira et al., 2002). Segundo a revisão de Sakoda et al. (2011), a presença da água favorece o fator de emissão. Esta consegue atenuar maior energia do que o ar. Caso um poro se encontre preenchido com água é mais provável que esta disperse a energia com que a partícula de radão se movimenta. Isto evita que a partícula choque com um grão adjacente e seja incorporada nele. O aumento da temperatura diminui a adsorção do gás às paredes dos grãos. No entanto, mesmo com uma variabilidade de temperatura significativa num solo, os resultados de difusão e de *recoil* mantêm-se. Apenas começa a ser significativa a partir das centenas de graus celsius. O tamanho dos poros também influencia o fator de emissão. Quanto maiores, mais espaço existe para atenuar a energia das partículas de radão e evitar que choquem com grãos adjacentes (Sakoda et al., 2011).

A permeabilidade dos solos e rochas é outra propriedade que afeta a exalação de radão e está intrinsecamente ligada ao tamanho do grão (Nero et al., 1990). É este parâmetro que representa a capacidade que o solo tem de transmitir o gás entre os seus grãos e, assim, permitir o transporte até à superfície. Em solos não consolidados, quanto maior o grão maior a permeabilidade. Em material rochoso, as rochas ígneas e metamórficas são muito pouco permeáveis, assim como os xistos argilosos. Ao contrário de arenitos, calcários e dolomites (Freeze & Cherry, 1979). No entanto, alguns aspetos geológicos potenciam a permeabilidade, tais como, rochas intensamente fraturadas, preenchimento de caixas de falhas e fraturas e dissolução de rochas carbonatadas (Pereira et al., 2010; Freeze & Cherry, 1979). Um

esquema retirado de Freeze & Cherry (1979), relativo a permeabilidades típicas de diversas litologias, é apresentado na figura 5. Outro aspeto geológico que pode influenciar os níveis de radão no interior das casas é a inclinação de camadas e de planos de xistosidade. O contacto entre duas camadas consecutivas representa um plano de fraqueza, por onde o gás pode migrar com maior facilidade. Caso os planos se encontrem inclinados podem facilitar a ascensão do gás até à superfície (Pereira et al., 2002).

A saturação da rocha em água afeta também a exalação do radão. Inversamente ao que acontece ao fator de emanação, acima mencionado, o teor em água faz diminuir a exalação do radão. Isto deve-se à mais baixa difusividade do radão na água ( $10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$ ), do que no ar ( $10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$ ) (Sakoda et al., 2011). Uma vez que o radão é dissolvido na água, terá mais dificuldade em escapar para o ar.

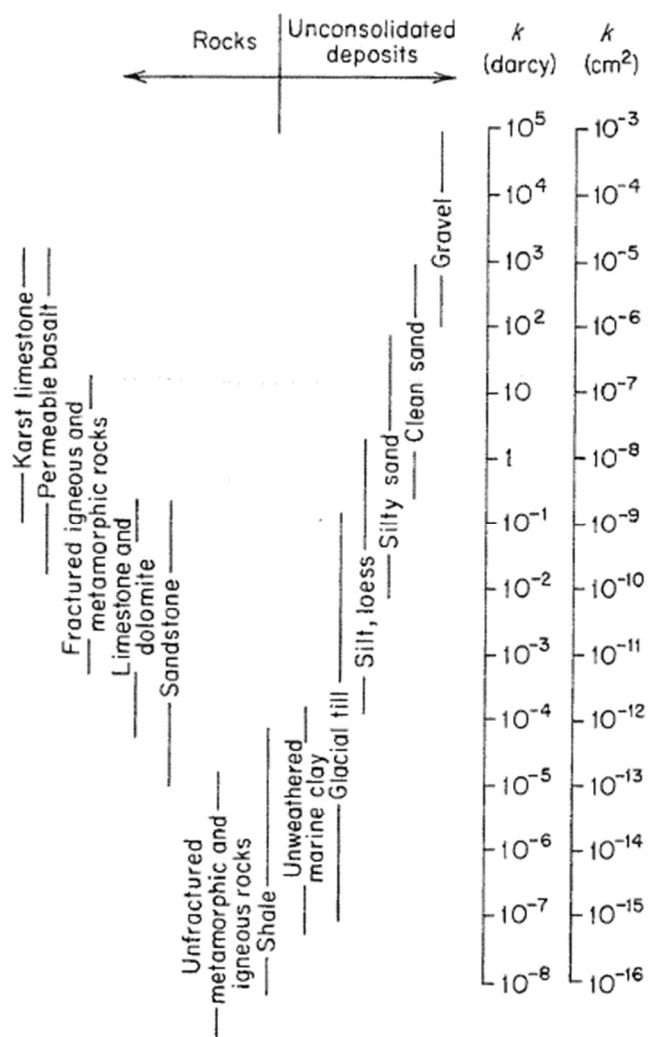


Figura 5 – Variação de valores de permeabilidade, típicos de rochas e solos. Retirado de Freeze & Cherry (1979).

A infraestrutura da casa é também um fator de variabilidade. À partida, em estruturas de casas que assentam diretamente sobre o solo, a taxa de transferência do radão para o seu interior tende a ser superior, por comparação a casas com caixa de ar. No entanto, segundo Nero et al. (1990), quando as caixas de ar se encontram fechadas o radão tende a acumular-se nelas e posteriormente tenderá a fluir para o interior da habitação. Quando estas se encontram abertas o efeito é contrário. Ainda assim, a ventilação natural muitas vezes tende a ser insuficiente para ventilar a caixa de ar (Nero et al., 1990). Por isso, um dos melhores mecanismos de redução de concentrações de radão é a implementação de um sistema de ventilação ativo numa caixa de ar.

O tipo de material geológico utilizado no aterro da casa também pode influenciar as concentrações de radão (Nero et al., 1990). O seu conteúdo em rádio, tal como nos materiais de construção, pode ser elevado. Também a granulometria deste material é importante. Material grosseiro aumenta significativamente a permeabilidade, enquanto granulometrias finas diminuem-na, mas são mais suscetíveis a variações na sua estabilidade. Uma granulometria uniformemente heterogénea, de grãos regulares, pode ser uma alternativa, uma vez que os espaços intergranulares são preenchidos por material progressivamente mais fino. No entanto, o método de aplicação neste caso terá um efeito significativo na compactação final.

A inclinação do terreno em que é construída a casa também pode ter impacto indireto nas concentrações. Existem muitas possibilidades de se construir em terrenos inclinados. No entanto, a mais frequente é aproveitar esse desnível para construir dois andares com acesso ao nível do terreno. Tal implica que pelo menos uma parede, total ou parcialmente, sustente terreno natural, aumentando assim a área por onde o fluxo de radão ocorre. No caso extremo, temos a construção de uma cave, onde todas as paredes se encontram em contacto com o terreno natural, funcionando de forma semelhante a uma caixa de ar fechada, de grandes dimensões.

Toda a técnica de construção, a estrutura da casa, os solos subjacentes e o aterro têm impacto na coesão das paredes e do chão. É normal começarem a ocorrer fissuras, sendo que a sua abertura e extensão potenciam significativamente a entrada do gás (Nero et al., 1990).

Tal como já mencionado, as diferenças de pressão entre os vários meios são o principal indutor de fluxo de radão. Embora as variações de temperatura dentro da casa sejam a principal fonte de variabilidade, outros processos que façam modificar o campo de pressões entre a casa e o meio envolvente, também podem contribuir para o fluxo de entrada. Como por exemplo, diferenças de temperatura entre o exterior e o interior da casa, ventos que originem diferenças de pressão ou a variação da pressão barométrica (Nero et al., 1990).

### *1.2.1.2 Produtos e bens essenciais*

O radão pode se concentrar na água em quantidades significativas, mas a sua contribuição para o radão no interior de habitações é condicionada pelo tipo de utilização (Pereira & Neves, 2012; Nero et al., 1990). Para que a componente gasosa se liberte da água é necessário um fluxo turbulento, como por exemplo ao lavar as mãos. Quanto maior a superfície de contacto entre a água e o ar, maior quantidade de radão irá escapar. No caso de um duche, como a água é forçada pelo chuveiro a separar-se e sair a grande pressão, é criada uma muito maior superfície de contacto com o ar. Aliada ao maior tempo de utilização da água, é o uso doméstico que liberta maior quantidade de radão da água para o ar.

As águas superficiais têm concentrações de radão dissolvido muito mais baixas do que as águas subterrâneas, pelo que o impacto radiológico a elas associado é significativamente menor. Já as segundas podem afetar (embora com pouca expressão) os valores de radão no interior da casa (Nero et al., 1990; Pereira et al., 2003). O maior problema verifica-se em captações de água particulares para abastecimento doméstico, em particular em zonas graníticas, que apresentam valores muito mais elevados do que as restantes águas (Nero et al., 1990).

Cálculos relativamente simples, com base em concentrações médias, apontam para que a relação entre a concentração de radão no ar, com origem na água, e a concentração de radão nessa água, é de cerca de 0,01% (Nero et al., 1990). Por exemplo, uma água com uma concentração de atividade de radão de  $100 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ , é estimado que contribua para  $10 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  da concentração média de radão no interior da casa. Em média, estima-se que essa contribuição corresponda a  $0,4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (Nero et al., 1990).

A contribuição do gás natural estima-se que seja negligenciável (Nero et al., 1990). Os restantes produtos e bens, ainda que possam contribuir para a exposição das pessoas a radiação ionizante por outros mecanismos (Pereira & Neves, 2012), não contribuem para as concentrações de radão medidas no interior de habitações.

### *1.2.1.3 Materiais de construção*

Os materiais de construção contribuem também relativamente pouco, embora mais do que a água. Neste caso, é a produção e a difusão do radão nestes materiais que é o principal fator de exposição ao gás. É nos casos em que as paredes são constituídas por material geológico enriquecido em  $^{226}\text{Ra}$  que se registam os maiores valores de difusão de radão; por exemplo, uma parede constituída por pedra maciça de granito terá maior contribuição que uma construída com agregado para o fabrico de betão da mesma natureza litológica. Em construção vertical, como os prédios, a contribuição do material de construção é superior à da construção horizontal, como é o caso das moradias (Nero et al., 1990).

### 1.2.1.4 Ar exterior

O ar exterior tem concentrações muito baixas de radão e sem grande variação sazonal ou diária. Do ponto de vista radiológico, estas concentrações não têm, em geral, grande significado. Ainda assim, o ar pode contribuir de forma significativa em casos onde as concentrações de radão no interior são baixas. Nomeadamente em apartamentos situados em pisos superiores, uma vez que o solo deixa de ser o principal contribuinte. O ar exterior pode então contribuir em média com  $10 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (Nero et al., 1990).

A tabela 3 mostra a contribuição média das diferentes fontes acima citadas para as concentrações do gás no ar interior.

Tabela 3 - Contribuição estimada de várias fontes para as concentrações de radão médias observadas. Retirado de Nero et al. (1990).

Fonte	Moradias	Apartamentos em prédios altos
	Bq m-3	Bq m-3
Solos e rochas	50	>0
Água (abastecimento público)	0,4	0,4
Materiais de construção	2	4
Ar exterior	10	10

### 1.2.2 Fluxo de saída do gás da habitação

Após a entrada do radão, é importante entender os modos de circulação de ar dentro da casa. Em função das entradas e saídas de ar disponíveis e em função das diferenças de pressão e dos fluxos de ar, diferentes pontos da casa irão ser ventilados de maneira distinta, assim como é expectável que essa ventilação varie temporalmente.

O principal fator que controla a circulação do ar, e por consequência a ventilação da habitação, é o tipo de utilização que os moradores dão à casa. É por isso um fator antropogénico, muito variável na sua essência, temporalmente variável e imprevisível. Este pode ser subdividido em vários atos do dia-a-dia, como abrir e fechar janelas e portas e como a utilização de sistemas de aquecimento, sistemas de ventilação e sistemas exaustores (Nero et al., 1990). É perceptível que o modelo, a cada variável, fica exponencialmente mais complexo. Só para o caso simples do abrir e fechar de janelas e portas, supondo uma casa com 8 janelas e 6 portas temos  $2^{8+6} = 16384$  possíveis combinações das janelas e portas, abertas ou fechadas. Ainda ficaria a faltar multiplicar pelas conjunções dos restantes



sistemas supracitados, que por sua vez podem ter diferentes modos de operar. A linearidade deste raciocínio é questionável, uma vez que algumas combinações têm um impacto final semelhante, mas cumpre com a finalidade de demonstrar a variabilidade intrínseca ao fator humano.

Outro fator a ter em conta é o vento exterior, também ele muito variável no tempo e imprevisível. Mais concretamente a sua velocidade e a sua direção. Na ausência deste, a ventilação pode ser feita apenas pela diferença de pressões, mas é um processo lento. Na presença deste a taxa de renovação do ar é incrementada. Novamente se coloca a questão das combinações, nomeadamente pelo facto de serem criadas correntes de ar diferenciadas pela casa, que ventilam de forma distinta cada local.

É também importante entender o percurso dos produtos de decaimento do  $^{222}\text{Rn}$ , que serão os principais responsáveis pela exposição das células do sistema respiratório à radiação. Quando os núcleos de polónio são formados no ar, podem formar aglomerados moleculares em torno dos núcleos neoformados. A estes dá-se o nome de produtos de decaimento não-acoplados. Contudo, os núcleos podem também acoplar-se às pequenas partículas que circulam no ar e, neste caso, designar-se por produtos de decaimento acoplados. Os não acoplados têm maior mobilidade no ar e, por isso, poderão depositar-se rapidamente nas superfícies da divisão, nomeadamente nas paredes. Os produtos de decaimento acoplados, devido à menor mobilidade, tendem a permanecer no ar e a ser mais facilmente inalados. No entanto, os não-acoplados, pela sua menor dimensão, aderem mais facilmente à superfície interior dos pulmões do que os núcleos acoplados. Estas relações fazem com que, no global, não haja grandes diferenças no impacto que ambas produzem na dose efetiva. Também justifica o facto da utilização de purificadores de ar não contribuir para a redução significativa de radão no ar (Nero et al., 1990).

Tabela 4 - Esquema síntese dos fatores que influenciam os fluxos de entrada e saída, para cada meio.

<b>Fluxo de entrada de radão nas habitações</b>	
<b>Solos</b>	<b>Considerações</b>
Concentrações de radão nos solos	Necessário ter em conta o desequilíbrio da cadeia de decaimento, a mobilidade dos isótopos e as estruturas geológicas.  Maior quantidade de água, maior o fator de emanção  Estruturas geológicas podem aumentar significativamente a permeabilidade. Maior a quantidade de água, menor o fator de exalação Assente no terreno ou com caixa de ar. Permeabilidade e estabilidade final do aterro. Existência de paredes a sustentar terreno natural, como por exemplo em caves.  Principal influenciador da variabilidade do fluxo de radão.
Concentrações de rádio	
Fator de emanção	
Distribuição do rádio nos minerais e na rocha	
Teor de água nos poros	
Tamanho dos poros	
Permeabilidade	
Teor de água nos poros	
Substrutura da casa	
Tipo de aterro	
Área de contacto entre a casa e o terreno	Existência de paredes a sustentar terreno natural, como por exemplo em caves.
Existência e extensão de fissuras	
Campo de pressões na casa e meio envolvente	
Temperatura da habitação	
Diferenças de temperatura entre exterior e interior	
Ventos	Principal influenciador da variabilidade do fluxo de radão.
Pressão barométrica	
<b>Produtos e bens essenciais</b>	<b>Considerações</b>
Água	Águas subterrâneas ou de superfície e litologias que intersejam. Tempo de utilização e tipo de fluxo que induz na água.
Tipo e proveniência	
Tipo de utilização	
<b>Materiais de construção</b>	<b>Considerações</b>
Concentração de rádio	Principal mecanismo da entrada de radão formado nos materiais; Utilização de material geológico integral ou como agregado.
Difusividade do gás no material	
<b>Ar exterior</b>	<b>Considerações</b>
Concentrações de radão no exterior	Concentrações muito reduzidas; A entrada depende das diferenças de pressão.
<b>Fluxo de saída de radão das habitações</b>	
<b>Ventilação</b>	<b>Considerações</b>
Utilização da habitação	Fator antropogénico, muito variável em função dos intervenientes, temporalmente variável e imprevisível
Janela e portas abertas ou fechadas	
Sistemas de aquecimento	
Sistemas de ventilação	
Sistemas de exaustão	Fator natural, temporalmente muito variável e imprevisível
Vento exterior	
Velocidade do vento	
Direção do vento	

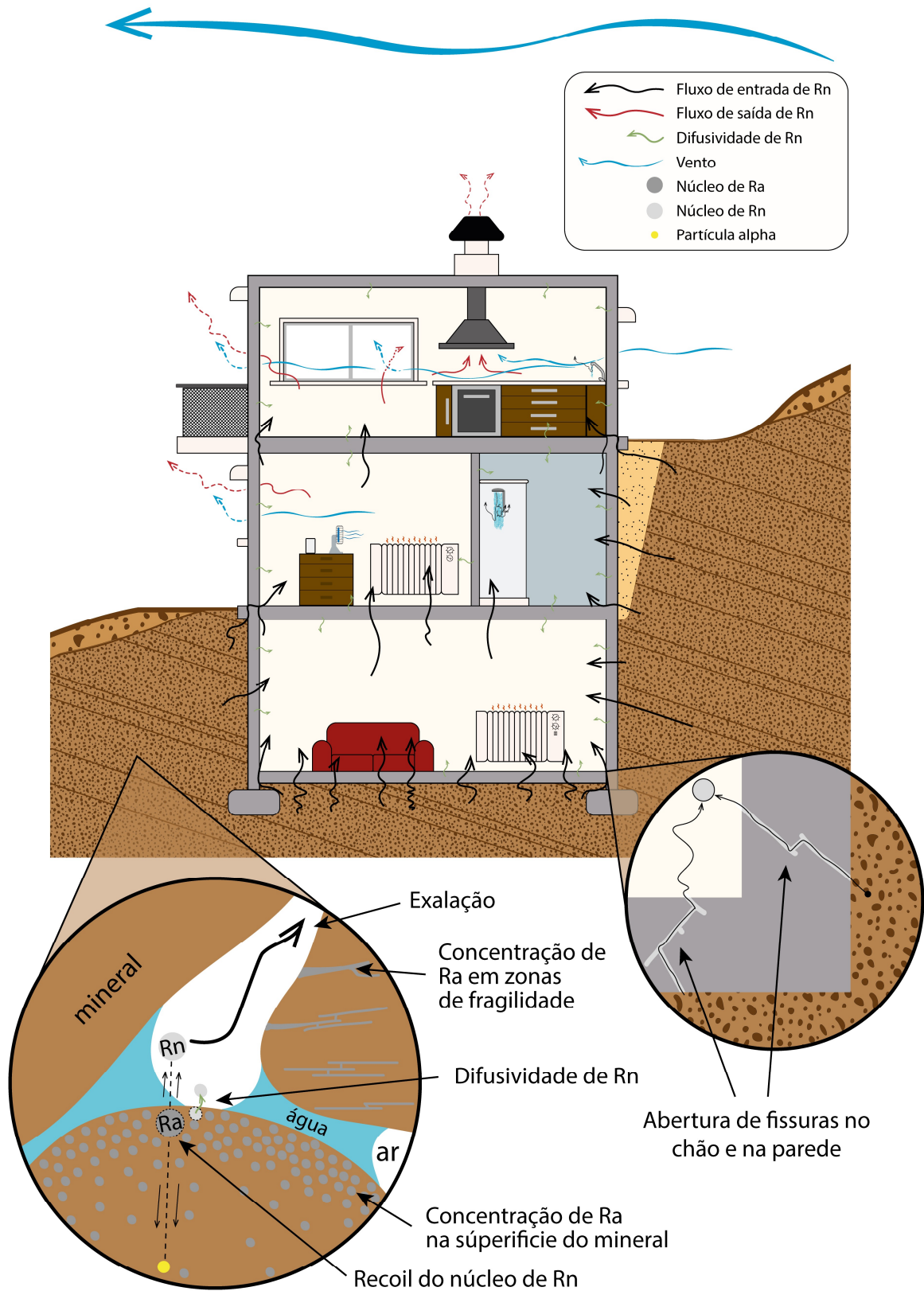


Figura 6 - Esquema ilustrativo de processos genéticos e de transporte de gás radão. As entidades subatômicas encontram-se a uma escala exagerada e inconstante, apenas com o intuito de ilustrar o processo.

### 1.3 Modelos de concentração de radão em habitações

Muitos dos fenómenos descritos são matematicamente complexos e por isso complicados de modelar (por exemplo, interação entre o campo de pressões da casa e do meio envolvente). Alguns também ainda não são bem compreendidos (por exemplo, mobilidade e equilíbrio de isótopos) enquanto que para outros, como por exemplo, a ventilação a obtenção de dados fidedignos é complicada.

É tarefa complicada obter um modelo completo e o mais rigoroso possível para uma casa. Apenas fazendo previsões e verificando os resultados experimentais é que se consegue afinar progressivamente o modelo (Nero et al., 1990). Tal metodologia acarreta o problema da especificidade, ou seja, funciona bem numa habitação, mas a extensão a outra aumenta o grau de incerteza nos resultados.

Como alternativa, pode-se definir um modelo para um conjunto de habitações. A vantagem é que a variabilidade dos fenómenos independentes que controlam as concentrações de radão, que se multiplicam, por ser aleatória e se sobrepor, pode ser descrita por uma distribuição de valores. A variável em estudo, para uma amostra suficientemente grande, ajusta-se a uma distribuição log-normal. Tal permite obter informações estatísticas da população. Não é demais mencionar dois pontos importantes: (i) apesar de suavizada a variabilidade, o seu efeito não desaparece dos parâmetros estatísticos. A atenuação da variabilidade vai depender da escala de regionalização desta; (ii) apesar da variabilidade ser atenuada no modelo, na realidade ela continua a existir. Por isso, os mapas criados nestes moldes são limitados e a sua utilização deve ser cuidadosamente analisada.

Os dois parágrafos anteriores evidenciam a problemática de escalas, associada ao mapeamento de radão em habitações e mapeamento de risco. Quanto maior a escala de análise (menor cobertura espacial), maior a especificidade do modelo. Por isso, é muito bom a prever quer a variabilidade dos fenómenos de influência, quer o fenómeno em estudo. Mas tem menor poder de previsão para outras áreas adjacentes. Os resultados desse modelo nada nos dizem sobre uma casa, por exemplo, a 500 metros de distância (até menos). Isto, porque a variabilidade dos fatores independentes é elevada. Quanto menor a escala (maior área espacial), menor a especificidade do modelo. Não oferece tanta informação, mas por isso suaviza grande parte da variabilidade, permitindo estudar uma população e correlacionar melhor os dados obtidos com áreas adjacentes. Consegue-se caracterizar áreas muito maiores.

Uma alternativa às duas supracitadas é reduzir o fenómeno modelado. As duas premissas, para encontrar a variável a modelar, são: (i) reduzir a dependência em variáveis de elevada variabilidade; (ii) manter a correlação entre a variável a modelar e o fenómeno (concentrações de radão em habitações). No fenómeno em estudo, estas premissas são

inversas, pelo que melhorar uma implica ceder na outra e uma solução de compromisso tem de ser encontrada.

Da relação entre fluxo de entrada e fluxo de saída de gás radão, apenas existe fluxo de saída, caso exista fluxo de entrada. Pode-se dizer que o fluxo de saída (variável dependente) depende do fluxo de entrada (variável independente). Nunca o contrário. O fluxo de saída é também a parte da relação com a variabilidade mais próxima do aleatório. Os fenómenos que a controlam são de origem ou antropogénica, e por isso imprevisível, ou natural com variabilidade temporal também aleatória. Tais propriedades fazem com que o fluxo de saída seja a primeira fração candidata a retirar do modelo.

No fluxo de entrada do gás, os fenómenos estão relacionados com a estrutura da habitação, que é invariável, com a interface estrutura-solo, igualmente invariável, e com a componente geológica, também invariável à escala de tempo de análise. Destas, é a geologia que contém o elemento gerador da problemática radiológica: o rádio nos solos e rochas. Antes da construção, o terreno natural tem associado a si um potencial de emanar e exalar radão: o designado potencial geogénico de radão (PGR). Os restantes fatores, relacionados com a habitação, são fruto das decisões humanas. Todas as intervenções humanas nesse local “trabalham” com esse potencial. Potenciando-o ou atenuando-o. Reduzindo o fenómeno a este potencial, o modelo fica significativamente mais simples.

Embora se saiba da existência de uma relação entre o potencial geogénico de radão e as concentrações de radão em interiores, é ainda difícil de quantificar a influência, em percentagem, que a primeira variável tem na segunda (Bossey, 2014; Bossey et al., 2020). Ainda assim, apesar do que é perdido na correlação dos fenómenos<sup>2</sup> (segunda premissa do modelo), ganha-se na diminuição de variabilidade (primeira premissa do modelo). A juntar a estas, ganha-se também com a simplificação do modelo. Por consequência, também são conseguidas outro tipo de informações. Nomeadamente uma caracterização espacial do espaço natural, importante para o planeamento.

Os dados a obter são em menor número e mais facilmente acessíveis (muitos inclusive existem dispersos em vários estudos). Com exatamente os mesmos meios, conseguem-se obter bases de dados mais completas para poucas variáveis. Dispersando os meios disponíveis por mais bases de dados, estas serão forçosamente mais incompletas.

---

<sup>2</sup> A perda de correlação é equivalente à percentagem, da variação das concentrações de radão, que não é justificada pelo potencial geogénico.

## 2. O MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO NATURAL

---

De acordo com diretivas da União Europeia, os países europeus, nos últimos anos, têm investido no mapeamento de diversos fenômenos radiológicos, visando a melhoria das condições ambientais para as populações, bem como a sensibilização das mesmas. O grupo *Radioactivity Environmental Monitoring* do *Joint Research Centre (REM – JRC)* da Comissão Europeia é responsável pela coleta, pela validação, pela harmonização e pelo reporte de dados radiológicos no ambiente. Com esse objetivo desenvolveu (e continua a desenvolver) o Atlas Europeu de Radiação Natural, composto por vários mapeamentos, quer de fontes de radiação natural, quer de fatores que contribuem para a exposição a essas fontes (CINELLI et al., 2019).

Dada a contribuição que o  $Rn^{222}$  tem para os níveis de exposição a radiação ionizante (UNSCEAR, 2008) e a sua importância para a saúde (WHO, 2009; IARC, 1988), o Mapa Europeu de Radão em Habitações, contido no Atlas Europeu de Radiação Natural, é uma ferramenta indispensável na avaliação de risco radiológico. No entanto, este tipo de mapas tem alguns problemas, sendo uns mais fáceis de contornar que outros, nomeadamente: a) a falta de dados para muitas das células do mapa, que pode acarretar problemas de interpolação, caso esta seja feita, ou simplesmente a falta de informação no mapa; b) o baixo número de medições também em muitas células induz também uma maior incerteza nos estimadores dos parâmetros estatísticos da população; c) a aglomeração de medições em zonas de elevada densidade populacional (problema da densidade das observações) pode induzir um enviesamento dos resultados; d) a falta de representação das flutuações temporais das concentrações de radão (quer sazonais, quer de ano para ano) ou, quando aplicados, as incertezas dos modelos de correção temporal; e) as incertezas espaciais associadas à localização geográfica, à definição de andar e da divisão da medição; f) a variabilidade dos estilos de vida e dos tipos de construções; g) e talvez o mais importante no mapa europeu, as diferentes escolhas de técnicas de medição entre países (Cinelli et al., 2019). Todos estes fatores afetam de forma direta ou indireta o cálculo de parâmetros estatísticos e a estimativa do risco. Tirando os problemas associados à aquisição dos dados propriamente ditos, as restantes variáveis podem ser corrigidas até certo ponto, por modelos matemáticos de transferência ou simulações (tendo sempre em consideração o erro associado), embora estes sejam na maioria das vezes de elevada complexidade (Cinelli et al., 2019; Gruber et al., 2013; Dubois et al., 2010; Kemski et al., 2009).

Os problemas acima mencionados não se colocam apenas para o Mapa Europeu de Radão em Habitações. Muitos destes fatores (e outros não listados) afetam também os estudos e mapeamentos de radão em habitações e risco associado, levados a cabo a nível

nacional. No entanto, na comunidade científica não existe consenso quanto às metodologias a adotar (Gruber et al., [s.d.]). Todas elas têm a sua finalidade, distinta mas interligada, as suas vantagens e as suas desvantagens. Países como a Hungria, Eslovénia ou Suíça, por exemplo, para o mapeamento de radão, utilizaram apenas dados de radão em habitações (Synnott & Fenton, 2005). Já na República Checa ou na Alemanha a base do mapeamento são as concentrações de radão nos solos com adição da informação geológica (Synnott & Fenton, 2005). Na Finlândia são utilizados dados de radão em habitações, mapas geológicos e classificação das habitações (Synnott & Fenton, 2005). Já em Espanha é utilizada a informação geológica, dados de radão em habitações, bem como dados de radiação gama natural (Synnott & Fenton, 2005; García-Talavera et al., 2013). Algumas metodologias serão analisadas com maior detalhe mais à frente.

Independente dos métodos, o ponto comum de todas estas metodologias nacionais é o seu objetivo final, para que os governantes, em conjunto com instituições governamentais, possam definir uma legislação adequada e desenvolvam um plano nacional para o radão. Esses objetivos são (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2015):

- (i) identificar áreas cujas médias (ou outro parâmetro estatístico de tendência central) das concentrações de radão em habitações (por exemplo, *Média Aritmética(Concentrações de Radão) > Nivel de Referência*), ou cujas percentagens espectáveis de habitações com concentrações de radão elevadas (por exemplo, *Prob[Concentrações de Radão > Nivel de referência] > Percentagem Definida*), sejam superiores às demais áreas, ou superiores ao valor de referência nacional, designando-se áreas propensas a radão (APR)<sup>3</sup> – são obtidos os mapas de áreas propensas ao gás radão (MAPR). O cálculo dos parâmetros de tendência central ou da percentagem de casas acima do nível de referência é o que vulgarmente se designa por Potencial de Radão (PR) de uma área, utilizado no ponto seguinte.
- (ii) estimar a exposição média da população ao gás radão dentro de habitações (por exemplo, *Média Aritmética(Concentrações de Radão)*). Dadas as metodologias de medição tipicamente adotadas, bem como pela facilidade de interpretação, é sempre reportada a exposição média anual, sendo esta tipicamente expressa em unidades de concentração de atividade ( $Bq \cdot m^{-3}$ ), em vez de unidades de exposição ( $C \cdot kg^{-1}$ ), por conveniência – são obtidos os mapas de radão em

<sup>3</sup> Pode-se entender como definição de APR, o texto que consta no terceiro ponto do artigo 103, da Directiva 2013/59/EURATOM de 5 de dezembro de 2013 (EU-BSS) (Council of the European Union (EU), 2013): “3. Os Estados-Membros identificam as zonas em que se prevê que a concentração de radão (em média anual) venha a exceder, num número significativo de edifícios, o nível nacional de referência pertinente.”. No entanto, esta é uma definição vaga e que suscita diversas interpretações, incluindo as acima citadas.

- habitações ou mapas de potencial de radão (MRH ou MPR). Embora não tão comum, também pode ser expresso em percentagem de casas acima do nível de referência (por exemplo,  $Prob[Concentrações\ de\ Radão > Nível\ de\ referência]$ );
- (iii) estimar o risco (%) associado ao gás radão em habitações. – são obtidos os mapas de risco de radão (MRR). Assumindo a relação linear sem limites entre o risco (%) e a concentração de atividade ( $Bq \cdot m^{-3}$ ) associada (Darby et al., 2006), esta estimativa relaciona-se diretamente com a anterior (ii), pelo que é frequente utilizar os mapas de radão em habitações para sensibilizar para o risco;

Dos pontos (i) e (ii) percebe-se que a variável de validação é sempre o radão no interior das habitações. Contudo, nos mapas de potencial de radão (MPR) a variável original e a variável de validação é a mesma. Já os mapas de áreas propensas a radão (MAPR) admitem outro tipo de variáveis originais, para delimitar áreas, cuja classificação é validada pelos dados de concentração de radão em habitações. Enquanto para os MAPR a variável cartografada é categórica, pois pretende-se uma classificação das áreas, para os MRH e MPR a variável é contínua, pois pretende-se especificar uma quantidade exata.

Os MRH, os MRR e em especial os MAPR, do ponto de vista nacional, são fundamentais para se enquadrar o estado do fenómeno radiológico nas habitações existentes. Permitem localizar áreas alvo onde uma intervenção por parte do estado é mais urgente, garantindo que o dinheiro público é direcionado de forma a obter um maior retorno (não financeiro, mas sim em melhorias da saúde pública). Como tal, o nível de referência nacional tem de ser cuidadosamente selecionado, bem como o limite da percentagem expectável de casas com concentrações de radão acima do nível de referência, acima do qual se define uma área como APR. Do ponto de vista da proteção das populações, a definição de valores de referência e percentagens mais baixas para esses parâmetros, diminuiria a exposição a radiação natural. No entanto, dada a distribuição tipicamente logarítmica do fenómeno, tal atitude implicaria um aumento exponencial da intervenção necessária em casas já existentes. Do ponto de vista prático, um rebaixamento significativo desses parâmetros seria impraticável pelo Estado e sem segurança de que as melhorias de saúde fossem significativas face à despesa pública (análise custo-benefício). O artigo 74 da Diretiva europeia EURATOM – Basic Safety Standards (EU-BSS) (Council of the European Union (EU), 2013), estipula que o nível de referência deve ser estabelecido pelos estados membros, mas este nunca pode ser superior a uma concentração de  $300 Bq \cdot m^{-3}$ . Em Portugal, o artigo 145.º do *Decreto-lei n.º 108/2018, da Presidência do Conselho de Ministros*, publicado no Diário da República n.º 232/2018, Série I de 2018-12-03, define como nível de referência  $300 Bq \cdot m^{-3}$  de concentração de atividade radão em habitações. A tabela 5, retirada de Gruber et al. ([s.d.]), sintetiza os níveis de referência e as condições definidas por vários países para a classificação de áreas propensas a radão.



Tabela 5 – Exemplos de definições de Áreas Propensas a Radão (APR) em alguns países europeus. Traduzido de Gruber et al. ([s.d.]). AM – média aritmética; Prob – probabilidade; C – concentração de Rn em habitações; IC – intervalo de confiança;

País	Definição de APR
Áustria	Modelação de AM > 300
Bélgica	Prob (C > 300) > 5%
Chipre	AM (C) > média nacional
República Checa	Prob (C > 300) > 30%
Finlândia	Prob (C > 300) > 10%
Alemanha	Prob (C > 300) > 10% com IC de 90%
Irlanda	Prob (C > 200) > 10%
Lituânia	Prob (C > 300) > 10%
Luxemburgo	Prob (C > 300) > 5%
Malta	Prob (C > 200) > 1%
Espanha	Prob (C > 300) > 10 %
Reino Unido	Prob (C > 200) > 1%

Não conseguindo precisar a relação, mas é perceptível que os custos de intervenção, para redução das concentrações de gás radão, numa habitação já existente, serão muito superiores aos custos necessários aquando da construção de uma nova habitação, para que sejam obtidos os mesmos resultados de concentração finais.

Não obstante a importância do cenário radiológico do complexo habitacional existente, deve ser também considerada a importância de condicionar radiologicamente a construção de novas habitações. Os mapas de radão em habitações, embora forneçam uma perspetiva generalizada do fenómeno, não são os mais adequados para caracterizar de forma objetiva um lote, ainda em terreno natural, disponível para construção.

Uma ferramenta muito mais indicada para o planeamento do território nacional, nomeadamente aquando da construção de novo edificado, e tendo em conta o contexto radiológico, é o Mapa de Potencial Geogénico de Radão (MPGR). Este mapa representa a medição daquilo que é vulgarmente designado na literatura europeia por “o que a terra oferece” (do inglês “*what earth delivers*”) (Gruber et al., 2013; Cinelli et al., 2019). Em termos teóricos, o potencial geogénico de radão (PGR) é o fluxo advectivo e difusivo de gás radão nos solos e rochas, normalizado para fatores não-geogénicos (como se não existisse uma habitação no terreno). Na prática, o fluxo de radão por difusão é desprezível. O PGR pode ser quantificado pelo designado “Potencial de Radão (PR) de Neznal” que se exprime pela equação (Neznal et al., 2004):

$$PGR = \frac{C - 1}{-\log_{10} k - 10} \quad (2)$$

C – concentração de radão nos poros dos solos ( $kBq \cdot m^{-3}$ )  
k – permeabilidade dos solos ( $m^2$ )

O PGR é, em termos absolutos, dependente do protocolo utilizado na aquisição dos dados (Bossew et al., 2020). Atualmente ainda não existe consenso quanto à metodologia mais correta a adotar. Inclusive, nos últimos anos têm sido promovidos encontros para

intercomparação das várias técnicas adotadas. Para detalhes relativos aos protocolos mais utilizados, para determinação da concentração de atividade de radão nos poros dos solos e determinação da permeabilidade, pode ser consultado o trabalho de Gruber et al. (2013) e referências aí citadas, sendo que o mais utilizado é descrito em Kemski et al. (2001) e definido em Kemski et al. (1996).

A definição de potencial de radão (PR) não é clara, em grande medida pelo facto de a designação ser linguisticamente genérica, e muitas vezes, mesmo entre especialistas na área, o termo ser utilizado indiscriminadamente, quer para definir o potencial geogénico de radão (PGR), quer o potencial de radão (PR). No entanto, o PGR diz respeito unicamente ao potencial de geração de radão do material geológico in-situ (emanação) e a sua ascensão (exalação) até à superfície, ou seja, é apenas afetado pelos processos geológicos e seus correlacionados (nomeadamente geomorfológicos e hidrogeológicos). O PGR é totalmente desprovido de fatores antropogénicos, ainda que para a definição de uma área geologicamente propensa a radão (AGPR) seja necessário ser correlacionável com concentrações e estimativas de risco de radão. A AGPR é então distinta de uma APR, que incorpora fatores antropogénicos na sua quantificação.

O grupo REM do JRC, indo de encontro à importância aqui atribuída à necessidade do mapeamento do potencial geogénico de radão, tem também como objetivo desenvolver o Mapa Europeu de Radão Geogénico, a incluir no Atlas Europeu. Várias metodologias também se encontram em cima da mesa, sendo que a proposta mais aceite até ao momento é a utilização de uma classificação categórica do PGR (atribuição de índices de alto a baixo PGR), com base em multivariáveis categóricas (Cinelli et al., 2019; Tollefsen & Cinelli, 2016; Bossew et al., 2016; Gruber et al., 2013). É previsto que essas categorias sejam depois utilizadas para atribuição de categorias de risco, através de Índices de Risco de Radão (Tollefsen & Cinelli, 2016; Bossew et al., 2016). Para tal é necessário que a informação das variáveis relacionáveis com o PGR esteja disponível, possibilitando, assim, estimar e classificar a variável de interesse. Contudo, a tarefa tem-se revelado “mais complicada do que o previsto”, pelo que o REM continua a desenvolver os restantes mapas do Atlas Europeu de Radiação Natural, que, quando completos, contribuirão como parâmetros a incorporar no Mapa Europeu de Radão Geogénico (Cinelli et al., 2019). Enquanto isso, têm sido aproveitados os dados existentes de alguns países para testar metodologias.

O trabalho mais recente de Gruber et al. ([s.d.]), com o apoio de fundos europeus e de instituições nacionais, é prova disso. O objetivo desta atividade (A4.4.2), contemplada no projeto MetroRADON, é aplicar diversas metodologias, com os mesmos conjuntos de dados disponíveis, às mesmas duas áreas de estudo. Muitos dos especialistas europeus na área, puderam assim avaliar e comparar as metodologias, bem como identificar as limitações de cada uma e as limitações impostas pelos próprios dados. Como seria de esperar, todas os

resultados das metodologias são comparáveis, mas diferentes. Mas nenhum se pode afirmar como menos (ou mais) válido que outro. Cada um tem o seu significado e deve ser interpretado de acordo com a metodologia adotada.

## 2.1 Síntese de metodologias

Algumas das metodologias mais recentes são aqui descritas de forma sintética. Face à extensa lista de possibilidades metodológicas, Gruber et al. ([s.d.]) apresentaram um esquema simples e aberto (permite a inclusão de novos conceitos), de classificação das metodologias. Este tem por base as três principais decisões que devem ser consideradas numa metodologia. São elas a unidade mapeada (U), o parâmetro mapeado (P) e o método apresentado (D). Mais do que um esquema de classificação, este esquema enfatiza quais as principais diferenças metodológicas. Repare-se que as diferentes técnicas não são incluídas neste esquema, o que sugere ser um fator de menor importância face aos demais contemplados. Na tabela 6, retirada do mesmo trabalho supracitado, é apresentado pelos autores, o esquema de enquadramento das metodologias.

*Tabela 6 – Esquema de classificação de metodologias em função dos três principais parâmetros a considerar. Retirado de Gruber et al. ([s.d.]*

<b>Unidade (U)</b>	<b>Parâmetro (P)</b>	<b>Método de descrição (D)</b>
1 – Unidade administrativa	1 – Valor de medição (ex. radão no interior de habitações)	1 – Estatística descritiva (ex. média, mediana, máximo)
2 – Células de grelha	2 – Valor modelado (ex. correção sazonal)	2 – Percentagem de medições acima do nível de referência
3 – Unidades geológicas	3 - combinação de diferentes parâmetros (ex. concentração de radão, geologia, permeabilidade)	3 – Probabilidade do nível de referência ser excedido
		4 – Classes de risco
		5 – Índice de risco

### *2.1.1 Espanha*

Em Espanha, dada a baixa cobertura dos dados relativos a concentrações em habitações, García-Talavera et al. (2013) demonstram que a utilização de dados de radiação gama, podem ser uma mais valia para delinear áreas propensas a radão (APR). O modelo final assenta numa pequena árvore de decisão, onde abaixo do limite de  $66 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ , com base em testes de significância, é possível definir uma área como não-APR. Acima do limite de  $66 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ , a radiação gama deixa ter capacidade de previsão e a classificação passa a ser feita, para cada unidade litostatigráfica, em função do 90º percentil da distribuição das concentrações de radão em habitações nessa mesma unidade. Caso seja superior ao nível de referência de  $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  a área é classificada como APR.

### *2.1.2 Reino Unido*

Para os dados de concentração de radão em habitações no Reino Unido (talvez a maior base de dados de radão em habitações existente no mundo), Miles & Appleton (2005) aplicaram uma metodologia para mapas de risco de radão (MRR), que conjuga a utilização de uma grelha regular (10 x 10 km) com os limites das unidades geológicas. Esta metodologia permite obter a variação dentro das unidades geológicas, bem como obter variações claras no contacto entre duas unidades geológicas adjacentes.

### *2.1.3 Alemanha*

Para o território alemão existe uma boa base de dados de radão nos solos e permeabilidade, pelo que se torna um bom local de estudo para mapas de potencial geogénico de radão (MPGR). Em Kemski et al. (2009) o objetivo foi construir um MPGR, para num passo seguinte, numa área de teste, elaborar um mapa de risco de radão (MRR). Neste trabalho é apresentada a metodologia detalhada para a construção do MPGR, bem como um fluxograma muito elucidativo. Embora não tenham sido apresentadas as concentrações de atividade de radão em habitações em forma de mapa, esta variável é indispensável na transferência de um mapa para o outro. O PR foi representado pelo cálculo indireto do “fator de transferência”, que corresponde ao rácio entre o radão no solo e o radão no interior das casas, incluído num parâmetro “z”, que é utilizado para estimar o risco de radão associado a cada célula do mapa. Dada a complexidade conceptual por detrás destes conceitos, encaminho o leitor para Kemski et al. (2009). Anteriormente, em Kemski et al. (2001) e em Kemski et al. (1996) foi mapeado apenas o PGR, com base numa matriz de classificação proposta, assente na relação entre a concentração de radão nos solos e a permeabilidade dos mesmos. Da equação para o

potencial de radão de Neznal (equação 2), entende-se que a metodologia adotada é um cálculo indireto e expedito do potencial geogénico de radão, agrupado categoricamente.

Também para o território alemão, Peter Bossew introduziu em 2014 a classificação binária de áreas, com recurso à análise da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*). A análise da curva ROC, que consiste na relação entre a taxa de verdadeiros positivos e a taxa de falsos positivos, permite otimizar a classificação binária (por exemplo, APR ou não-APR) de uma variável para a qual não se conhece um limite de distinção, com base num critério definido de uma outra variável para a qual existe um limite conhecido (Bossew, 2014). Em simultâneo, é possível atribuir maior importância e fazer concessões entre erros do tipo-I e erros do tipo-II na classificação de áreas, bem como pela simulação de vários critérios definidos, é possível escolher o mais adequado (Bossew, 2014; 2015). Em 2015, o mesmo autor apresentou uma metodologia baseada também na classificação binária pela análise ROC, no entanto para otimizar uma variável categórica (Bossew, 2015). Esta variável foi a geologia, sendo cada unidade geológica uma categoria ( $k$ ). O objetivo é, para um conjunto ( $b$ ) de categorias ( $k$ ), determinar quais destas se devem classificar como zero (0) e quais se devem classificar como um (1) (sistema binário), ou seja, APR ou não-APR. O conjunto tomará a forma de número binário, como por exemplo  $b = 1011001001000$ . Não existe limite de categorias, no entanto o processamento cresce exponencialmente em função do seu número. Sendo que a variável deixa de ser contínua, em vez de uma curva ROC passa a existir uma “nuvem de pontos” ROC. Dada essa característica de dispersão, é normal encontrar um conjunto de soluções ( $b's$ ) que apresentam um valor muito semelhante do parâmetro utilizado para obter a classificação ótima ( $b_{ótimo}$ ). O que pode ser visto como um problema, é também a solução para estabelecer o grau de confiança para a classificação de cada categoria, através do que o autor designou como índice de confiabilidade. Para mais detalhes sobre as bases da metodologia deve ser consultado Bossew (2014) e para a melhoria da metodologia, Bossew (2015). Nestes casos, os métodos foram aplicados para a definição de APRs e elaboração de MAPRs, no entanto, podem ser adaptados para a elaboração de mapas de potencial geogénico de radão MPGRs.

#### *2.1.4 Canadá*

Na província do Quebec (Canadá), em 2007, o nível de referência das concentrações de radão em habitações foi reduzido de  $800 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  para  $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ . No entanto, até àquela data, a base de dados de concentrações de radão em habitações era limitada. Existiam apenas 3 082 medições, que cobriam apenas cerca de 15% do território. Drolet et al.(2013) demonstraram que existe uma relação proporcional positiva entre as três variáveis estudadas

- concentração de urânio equivalente (eU) a partir de aquisições de radiação gama aerotransportadas, concentração interpolada de urânio de campanhas geoquímicas e unidades geológicas propensas e não propensas a radão - e a percentagem expectável de casas que excedem o nível de referência. Mais ainda, definiram critérios (limites) para a classificação de áreas propensas a radão, através de análises de variância (ANOVA) de Kruskal-Wallis, a vários pares de classes uniformemente crescentes, para cada uma das variáveis. Com base nestes critérios definidos, Drolet et al. (2014) elaboraram um mapa de áreas propensas a radão. Combinaram as classes de cada variável, em cenários possíveis. Em seguida, fizeram uma série de testes de Kruskal-Wallis, para agrupar os cenários estatisticamente semelhantes, em classes de potencial de risco de radão. O mapa, elaborado com base nestas metodologias, cobre cerca de 98% da província do Quebec, face aos 15% de área coberta por dados de concentração de atividade no interior de habitações. Na ausência de dados de radão em habitações (economicamente difíceis de obter), os critérios geogénicos revelaram ser uma boa alternativa. Este estudo ainda demonstra a debilidade de um mapa construído com base em limites políticos, sem qualquer relação com a geologia (Drolet et al., 2014; 2013).

### *2.1.5 França*

Na França, a identificação de áreas propensas a radão tem por base unicamente dados geológicos. No entanto, a metodologia adotada não pretende estimar diretamente o potencial geogénico de radão, uma vez que a informação de radão nos solos e de permeabilidade é escassa, no país. A metodologia alicerça-se na relação entre as concentrações de U nas rochas e as concentrações de radão no interior das casas. Em Ielsch et al. (2010) é apresentada a metodologia adotada, com o exemplo de um caso de estudo na região de Bourgogne. Numa primeira fase, são feitas análises a bases de dados de concentrações de U, para estabelecer um valor médio para as diferentes litologias, a uma escala de 1:1 000 000. Como limites da estimativa são então utilizados os limites geológicos, em detrimento de limites administrativos ou grelhas regulares. Numa segunda fase, o mapa é modificado, para que sejam incluídas unidades de menor dimensão, não cartografadas no mapa geológico à escala 1:1 000 000, mas significativamente distintas das unidades que as continham, em termos radiológicos. Às unidades foi atribuído um nível de propensão a radão (de cinco níveis disponíveis). Numa segunda fase foram cartografados parâmetros adicionais, que possam influenciar positivamente o fluxo de radão, tais como: falhas de grande enraizamento, falhas recentemente ativas, poços e galerias de minas e fontes de águas subterrâneas. Para cada um, foi estabelecido um perímetro de influência, ao qual estes parâmetros acrescentam um nível de potencial de radão. O mapeamento final consiste na

sobreposição desta informação e redução a apenas três níveis de áreas propensas a radão, para mais fácil interpretação por parte dos organismos do estado. A melhoria destas estimativas e a descrição do processo e dos resultados, da análise extensiva, são descritos em Ielsch et al. (2017). Para esta metodologia, o conhecimento geológico é fundamental. Quer a interpretação dos dados geoquímicos, quer o trabalho geológico de campo, influenciam as decisões tomadas no mapeamento. Mas não são quantificáveis em termos de incertezas. As evidências geológicas são frequentemente assentes em evidências visuais, e não numéricas, ao contrário do que é frequente no mapeamento de radão, assente em estatística.

Todas as definições apresentadas neste capítulo, tal como foi sendo referido em algumas delas, são muitas vezes utilizadas indiscriminadamente. Principalmente os termos mais genéricos. Deve-se essencialmente a três motivos: as definições de algumas destas variáveis sobrepõe-se quase na sua totalidade, os parâmetros que contribuem para elas também se interseccionam e sobrepõem quase na totalidade e as quantidades e unidades expressas são muitas vezes iguais, uma vez que as variáveis muitas vezes se relacionam entre si, de forma direta. Na figura 7 é representada de forma esquemática a relação de muitos dos conceitos aqui abordados e metodologias possíveis de aplicar, com a indicação da localização esquemática de alguns trabalhos supracitados.

No âmbito de investigação, muitas destas definições são “banais” entre a comunidade de especialistas. Uma pessoa com experiência na área consegue contextualizar um termo genérico através de vários mecanismos, tais como as metodologias aplicadas, as análises efetuadas, os resultados obtidos e a sua representação, entre outros. No entanto, no âmbito do processo legislativo, muitas pessoas que terão de expressar a sua opinião e outras que terão de tomar decisões, não possuem, na sua grande maioria, experiência na área de radioatividade natural. Para essas pessoas, e para que nos intermédios do processo de investigação e desenvolvimento de mapas e do processo de decisão, não se perca nem definição nem rigor dos resultados apresentados, é fundamental distinguir os conceitos de forma clara e objetiva. Este preciosismo não é algo de novo já que alguns dos autores aqui supracitados demonstram também esse cuidado nos seus trabalhos, mas o que também demonstra que este é um ponto suscetível de interpretações menos precisas.

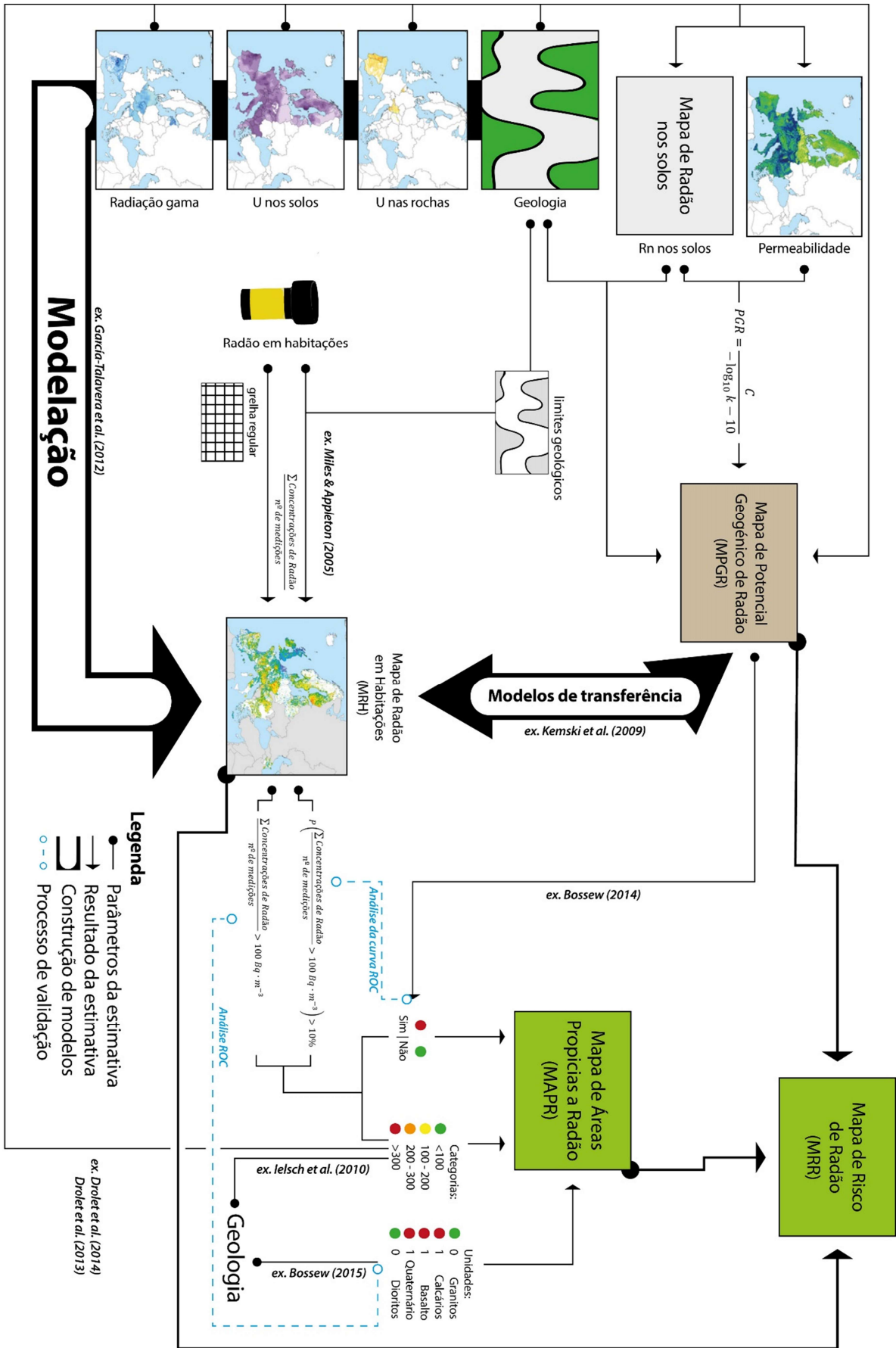


Figura 7 - Esquema síntese de definições utilizadas em proteção radiológica ambiental, as suas relações e metodologias possíveis de aplicar no seu mapeamento. Os mapas europeus, apenas com propósito ilustrativo neste esquema, foram retirados do Atlas Europeu de Radioatividade Natural, que pode ser consultado em <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation>



### 3. ENQUADRAMENTO DAS ÁREAS DE ESTUDO

---

No presente estudo foram escolhidas duas áreas, geologicamente semelhantes, para testar e aplicar algumas das metodologias atrás descritas, para as quais já se dispunha de um acervo de dados muito significativo, e com o objetivo de rentabilizar temporal e economicamente o mapeamento de áreas propensas a radão (APRs), a diferentes escalas de trabalho.

A primeira área analisada situa-se na região de Tondela (figura 10). O concelho de Tondela é limitado pelos concelhos de Vouzela e Oliveira de Frades a Norte, por Águeda a Oeste, Mortágua e Santa Comba-Dão a Sul, Carregal do Sal a Sudeste e Viseu, sede de Distrito, a Nordeste. A área de estudo abrange 86 km<sup>2</sup> e não é condicionada por qualquer tipo de limite administrativo. Foi selecionada unicamente por representar um contexto geológico específico, suportado em informação geológica disponível à escala de trabalho de 1:25 000.

A segunda área analisada situa-se na região de Oliveira do Hospital (figura 10), a Sudeste da região de Tondela. O concelho de Oliveira do Hospital é limitado pelo concelho de Nelas, a Norte, pelo concelho de Seia a Este, de Arganil a Sul, de Tábua a Oeste e de Carregal do Sal a Noroeste. Esta área de estudo abrange 94 km<sup>2</sup> e segue mais de perto o limite administrativo do concelho. Embora esta área tenha sido alvo de estudo a uma escala regional de 1:25 000 foram efetuados estudos a escalas de maior pormenor elaborados, nalguns casos, a 1:1 000. Estes últimos, em 4 setores, situados, respetivamente, a sul de Nogueira do Cravo (sector A; figura 10 – sA – e figura 11), a sudoeste do Senhor das Almas (Malha Pão; sector B; figura 10 – sB – e figura 11), a nordeste do Senhor das Almas (Vila da Baguinha; sector C; figura 10 – sC – e figura 11) e em Oliveira do Hospital (Chão do Prado; sector D; figura 10 – sD).

Segundo o mais recente recenseamento nacional (INE, 2012), o concelho de Tondela tem cerca de 28 mil habitantes e o de Oliveira do Hospital cerca de 20 mil habitantes. Após um período de abandono generalizado do interior do território nacional, por parte de famílias em busca de melhores oportunidades, nos últimos anos, as cidades de Tondela e Oliveira do Hospital têm expandido a sua área urbana, devido ao forte incentivo à indústria, que reciprocamente investiu nestas áreas.

As áreas de estudo situam-se na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico. O substrato rochoso com maior relevância para o estudo pertence a uma extensa área predominantemente granítica, designada Granito das Beiras. Este batólito intrui metassedimentos diferenciadamente afetados pelas várias fases de deformação varisca. A intrusão terá originado auréolas de metamorfismo de contacto, com 1 a 2 km de extensão, de onde terão resultado as corneanas e os xistos mosqueados, tal como é observado na área de

Tondela. Estes litótipos surgem também como encraves no granito, por vezes com áreas consideráveis, ou por vezes intercalados de forma e extensão considerável, como é observado na zona norte da área de Tondela e, especialmente, na zona sul da área de Oliveira do Hospital (Salgado et al., 1998; Teixeira et al., 1961; Pereira, 1991; Pereira et al., 2010).

Os metassedimentos, pré-ordovícicos, pertencem ao Grupo das Beiras do Supergrupo Dúrico-Beirão (Sousa & Sequeira, 1989), vulgarmente conhecido como Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) (Carrington da Costa, 1950; Teixeira, 1955), termo esse muito enraizado na literatura devido ao seu carácter descritivo.

O CXG, como o nome indica, é composto por intercalações de xistos e metagrauvaques, do Neoproterozóico (Ediacariano) ao Câmbrico inferior (Pereira et al., 2012). É constituído por 3 sub-grupos: o acima mencionado Grupo das Beiras (Silva et al., 1988; Silva, 2005), o Grupo do Douro (Sousa, 1982) e o grupo de Arda-Marofa (Silva et al., 1995; Silva, 2005), este último não aceite por todos os autores. Tipicamente são sequências turbidíticas, do tipo *flysch*, com ocorrências calciturbidíticas no Grupo do Douro (Meireles et al., 2014). A deposição destes sedimentos está diretamente ligada à cintura orogénica Cadomiana, a Norte do supercontinente Gondwana (Pereira, 2015).

Em outros locais, o batólito interceta outros metassedimentos, com idades compreendidas entre o Ordovícico e o Carbónico Superior, segundo o núcleo do sinclinal NW-SE de Porto-Sátão, que registam uma sequência incompleta da sedimentação pré a pós-orogénia varisca (Azevedo & Aguado, 2006; Pereira et al., 2012).

Diversas classificações têm sido propostas para os granitoides da ZCI. Em Azevedo & Aguado (2006) são descritas e correlacionadas as classificações petrográficas, geoquímicas, estruturais e geocronológicas mais relevantes, de onde é retirada a tabela 7. Com os indícios mais recentes, ainda segundo os mesmos autores, sabe-se que o plutonismo varisco está intimamente relacionado com a última fase de deformação da orogénia (D3) e terá ocorrido segundo dois ciclos de atividade magmática. Por relação com D3, podemos classificar os granitos em ante-, sin-, tardi- e pós-D3. As intrusões pré-variscas são escassas e designam um grupo geocronológico denominado “*Oldest*”, não contemplado nas classificações mais antigas. Os granitos “*Younger*” e os granitos “*Older*” são claramente designações de relação temporal e correspondem respetivamente aos granitos tardi- e pós-D3 e aos granitos ante- e sin-D3. Dos últimos, os ante-D3 têm pouca expressividade no território nacional e dos sin-D3 fazem parte a maioria dos granitos e leucogranitos (ii), peraluminosos de duas micas, alguns granitos biotíticos e alguns granodioritos (i). Dos granitoides tardi- e pós-D3 fazem parte a maioria dos granodioritos e granitos biotíticos (iii), com tendência porfiroide, de baixa peraluminosidade, aos quais estão associadas rochas básicas e intermédias, bem como os granitos biotítico-moscovíticos (iv) mais tardios (figura 8) (Azevedo & Aguado, 2006).

Tabela 7 – Classificação estrutural e geocronológica dos granitóides ibéricos (retirado e adaptado de Azevedo & Aguado (2006))

### Granitóides Variscos

Classificação		Fácies Mais Comuns	Idades U-Pb
Granitóides Tardi-pós-D3	“Younger”	<ul style="list-style-type: none"> <li>(iv) Granitos biotíticos, biotítico-moscovíticos e de duas micas, por vezes porfiróides</li> <li>(iii) Granitos essencialmente biotíticos, frequentemente porfiróides</li> <li>Gabros, dioritos, monzodioritos quartzíticos e granodioritos</li> </ul>	310 – 290 Ma
Granitóides Sin-D3	“Older”	<ul style="list-style-type: none"> <li>(ii) Leucogranitos e granitos de duas micas, com deformação variável</li> <li>(i) Granodioritos e granitos biotíticos, com deformação variável</li> </ul>	320 – 310 Ma
Granitóides Ante-variscos	“Oldest”	<ul style="list-style-type: none"> <li>Granitóides do Proterozóico superior ao Paleozóico inferior (ortognaisses)</li> </ul>	

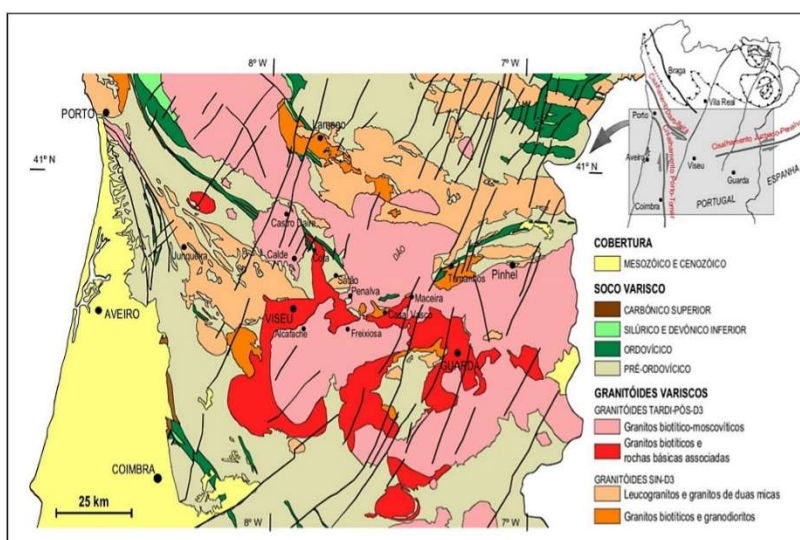
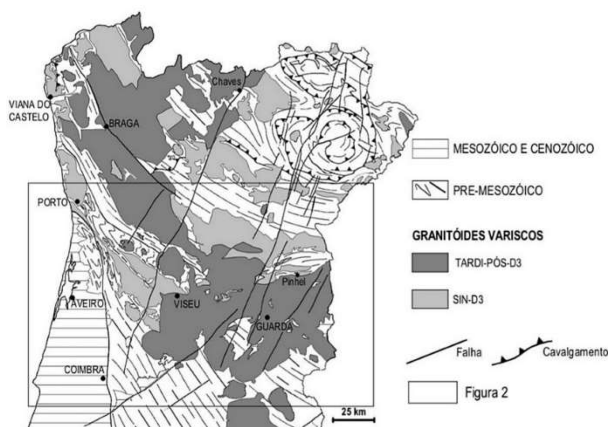


Figura 8 - Granitóides variscos no Centro e Norte de Portugal e esquema geológico simplificado do Batólito das Beiras. (retirado de Azevedo & Aguado (2006))

É proposto que o magmatismo varisco esteja correlacionado com o espessamento e posterior adelgaçamento da litosfera continental, durante a evolução da cadeia orogénica, e por isso exista uma relação de dependência entre este e os processos de metamorfismo. Durante D1 (figura 9.a) terá ocorrido metamorfismo regional, com a elevação do orógeno através do espessamento da litosfera, onde se atingem as condições para o início da fusão parcial anatética. D2 (figura 9.b) corresponde a uma fase onde predominam tensões distensivas, que proporcionam a exumação do orógeno. A rápida descompressão permite que as temperaturas atingidas se mantenham sob condições de menor pressão, o que potencia a fusão parcial, dando origem a maiores quantidades de magma. Em D3 ocorre a separação do magma da restante componente sólida, a sua ascensão, diferenciação e posterior consolidação (figura 9.c). Estes magmas são do tipo-S, peraluminosos, que dão origem aos (ii) leucogranitos e granitos de duas micas sin-D3. Em simultâneo, a parte inferior da litosfera fica mais densa, inclusive do que a astenosfera, o que dá origem a uma instabilização gravítica, levando ao seu afundamento e à ascensão da astenosfera. Esta, sob condições de descompressão isotérmica, funde parcialmente e origina magmas máficos. O fluxo de calor, resultante destes magmas, permite fundir mais material crustal e inclusive proporciona o *mixing* e hibridização dos líquidos de composição distinta. O magma resultante tem características transacionais, entre magmas do tipo-S e magmas do tipo-I e dá origem aos (i) granodioritos e monzogranitos biotíticos, sin-D3. Após o clímax de D3 (figura 9.d), a progressiva fusão da astenosfera, faz com que os magmas transacionais tendam cada vez mais para um carácter mais máfico, metaluminoso, dando origem aos (iii) granitos biotíticos tardi-pós-D3. Para os (iv) granitos biotítico-moscovíticos tardi-pós-D3 admite-se uma fonte e processos semelhantes aos anteriores, mas com uma afinidade mais crustal (Azevedo & Aguado, 2006).

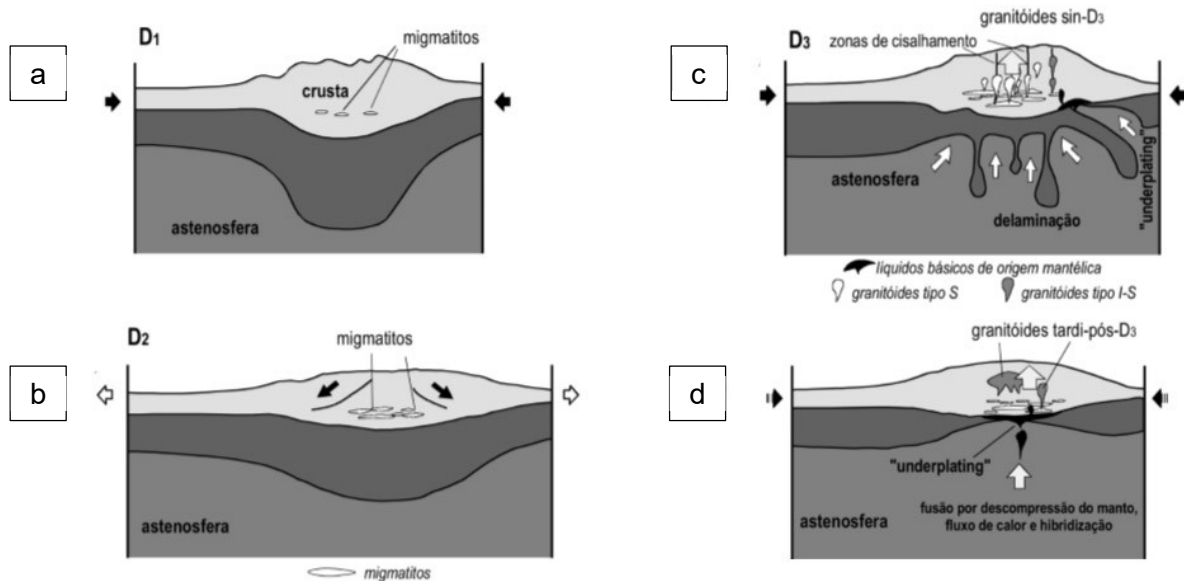


Figura 9 - Evolução tectono-magmática do Batólito das Beiras durante a orogenia varisca. (retirado de Azevedo & Aguado (2006))

Na região de estudo foi feito um levantamento geológico de pormenor, à escala 1:25 000, por Pereira (1991). Deste trabalho resultou a nomenclatura para os granitos, que será utilizada nesta dissertação, com base em nomes locais. O autor definiu o Granito de Tondela (GT), Granito de Tábua (GTB), Granito da Várzea (GV) e o Granito de Oliveira do Hospital (GOH), entre outros de menor expressividade e que não são relevantes para os casos de estudo (figura 10).

O Granito de Tondela é um granito biotítico, porfiroide, peraluminoso, com megacristais de feldspato e uma matriz grosseira a média (Teixeira et al., 1961; Pereira, 1991). Existem evidências de deformação no estado sólido e a sua acomodação parece ser concordante com as estruturas variscas D3, sugerindo que a sua implantação terá ocorrido sin-D3 (Pereira, 1991). É, portanto, um granito “*Older*”, incluído no grupo (i), dos granitos biotíticos e granodioritos sin-D3, descrito anteriormente. Os granodioritos não afloram na área de estudo, contudo, dentro do granito existem fácies mais granodioríticas.

O Granito de Tábua é um granito biotítico porfiroide, peraluminoso, com megacristais de feldspato, maiores que os do Granito de Tondela, bem como uma matriz notoriamente mais grosseira (Teixeira et al., 1961; Pereira, 1991; Silva, 1995). Os fenocristais encontram-se alinhados em planos verticais, orientados segundo N0-10°E. Estes possuem frequentemente inclusões concêntricas de biotite (Silva, 1995). Este granito será considerado um granito “*Younger*” e dever-se-á inserir no grupo (iii) dos granitos biotíticos tardi-pós-D3. É ainda de assinalar que dos corpos granitóides maiores, das áreas de estudo, este é o que apresenta maiores teores de Th e U (Pereira et al., 2002; Lamas et al., 2015; 2017).

O GTB apresenta zonamento, implícito pela variabilidade espacial de alguns elementos acidófilos. A passagem do Granito de Tábua para o Granito de Oliveira do Hospital é gradual, de uma textura grosseira a uma textura mais fina e com aumento da quantidade de moscovite, sugerindo um zonamento anelar, do conjunto granítico. O Granito de Tábua materializa uma fácies mais externa, mais próximo do contacto com metassedimentos, enquanto o Granito de Oliveira do Hospital materializa a fácies interna. O Granito de Tondela não faz parte deste zonamento textural, com uma passagem textural mais brusca a granulometria mais fina (Pereira, 1991; Silva, 1995).

O Granito da Várzea é um granito de duas micas de grão fino a médio. É possível identificar uma zonalidade interna, possivelmente relacionada com o seu encaixante. Granulometricamente, o granito tende de forma gradual para grão mais grosseiro e progressivamente surgem fenocristais de feldspato, assemelhando-se ao Granito de Tondela. Por sua vez, existe uma mancha de granito porfiroide, com semelhanças ao Granito de Tondela, incluída no centro do Granito da Várzea (Teixeira et al., 1961).

Os granitos porfiróides são intercetados por outros corpos de natureza granítica de menor envergadura, com maior incidência sobre o Granito de Tondela. O filão com maior

expressão é o de Molelinhos-Salgueiral, NNE-SSW. Apresenta grão fino a médio, sem megacristais e com maior quantidade de moscovite e quase sem biotite. Essencialmente devido à composição da plagioclase (Albite) estes corpos são classificados de granitos alcalinos (Teixeira et al., 1961).

Toda a região encontra-se intensamente fraturada. Algumas das fraturas são preenchidas por filões quartzosos ou por vezes aplopegmatíticos. A reativação destas discontinuidades, como falhas, em muitos casos deu origem à brechificação da caixa de falha.

No sector B e sector D de Oliveira do Hospital, é possível observar na caixa da falha principal aflorante em cada sector, mineralização secundária de U (Pereira & Neves, 2012). No sector A e no sector C, ainda que associada a uma intensa rede de fraturas, a mineralização de U encontra-se disseminada nos encraves metassedimentares (Pereira et al., 2010; Pereira & Neves, 2012).

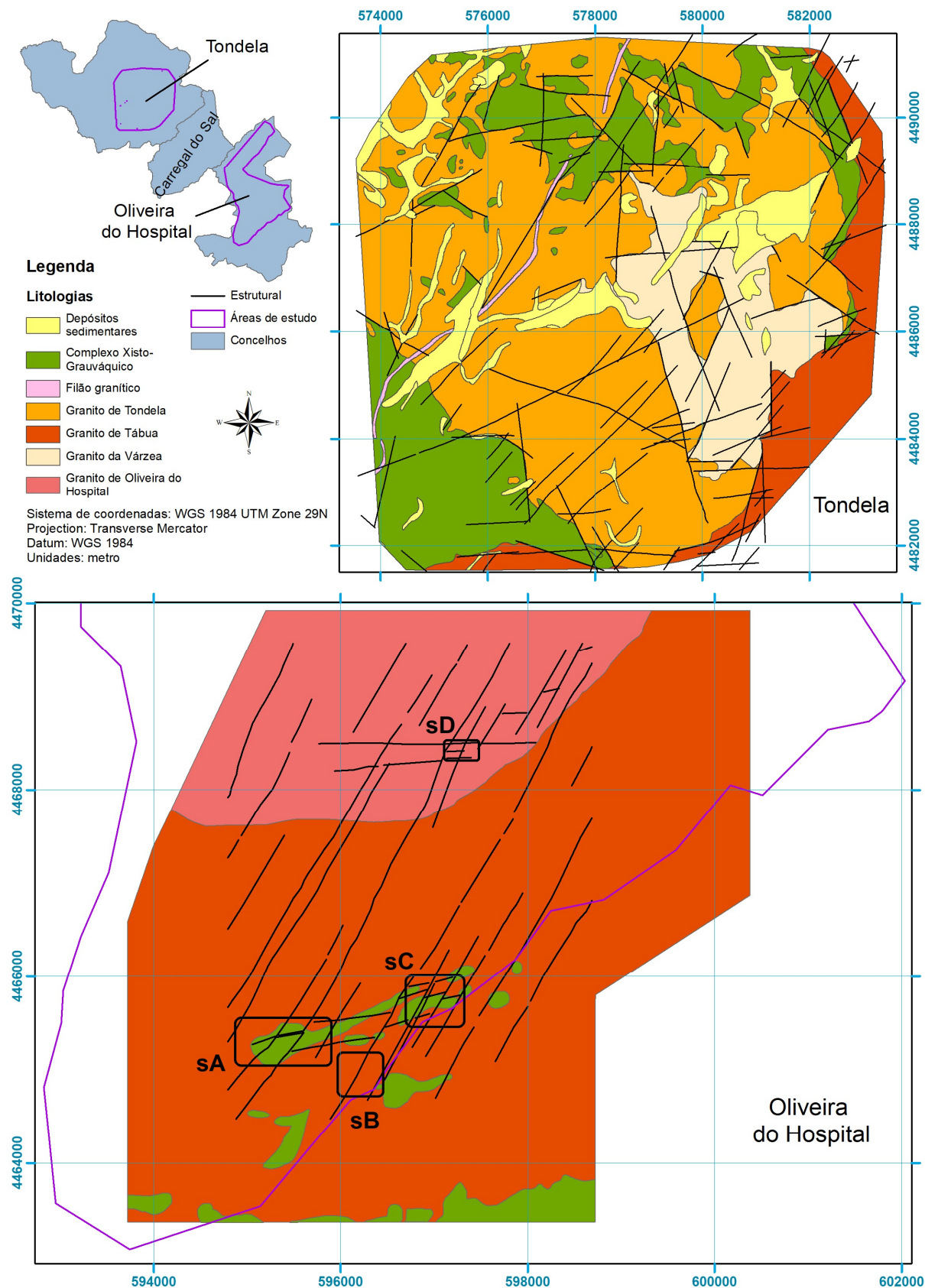
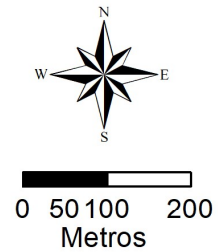


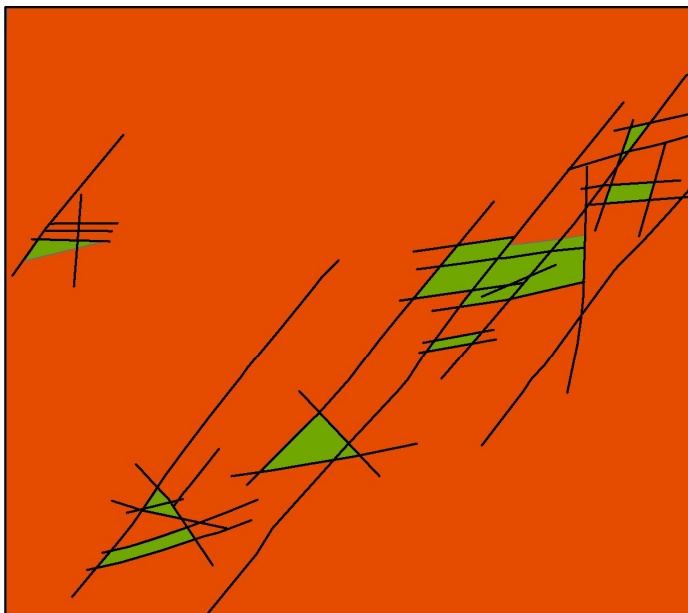
Figura 10 – Cartografia geológica elaborada à escala 1:25 000, para as áreas em estudo. A área de Tondela foi vetorizada e georreferenciada a partir da cartografia de Salgado (2000). A área de Oliveira do Hospital foi adaptada de Pereira (1991) e da carta geológica e topográfica nº 222 da Empresa Nacional de Urânio (ENU) (não publicada). Para além da área dos sectores de estudo de pormenor (sA – sector A; sB – sector B; sC – sector C; sD – sector D), a área de estudo de Oliveira do Hospital estende-se para norte, onde não existe cartografia disponível à escala 1:25 000. Contudo, pela cartografia nacional à escala 1:50 000, sabe-se que continua o predomínio do granito biotítico porfiroide grosseiro e grosseiro a médio.



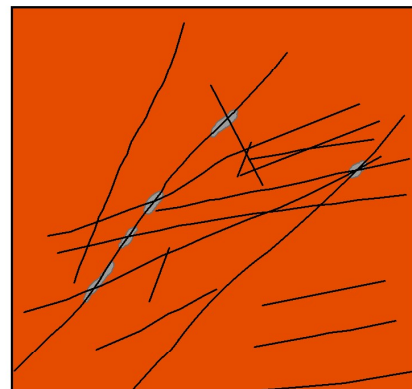
## Sector A - Enclave de Nogueira



## Sector C - Vale da Baguinha



## Sector B - Senhor das Almas

**Legenda**

- Estrutural
- Granito de Oliveira do Hospital
- Complexo Xisto-Grauváquico

Figura 11 – Cartografia dos enclaves metassedimentares e da estrutura mineralizada para os sectores A, B e C, elaborada a uma escala 1:2 000 por Pereira et al. (2010).

Até ao melhor do meu conhecimento e até à data, a grande maioria dos trabalhos de carácter científico (excluindo claro os trabalhos de prospeção da Empresa Nacional de Urânio (ENU)), desenvolvidos na zona centro de Portugal, na área da radioatividade natural, têm tido o apoio do Laboratório de Radioatividade Natural (LRN) da Universidade de Coimbra (outra Grupo de Modelagem de Sistemas Geológicos, do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra). Ao longo dos anos, o LRN, através dos trabalhos de investigação desenvolvidos, foi construindo uma extensa base de dados radiológicos, nunca publicados na sua totalidade. Em Pereira et al. (2002) é elaborada uma síntese a parte desses dados, relativos a áreas urbanas da zona centro de Portugal, relevantes para o caso em estudo. Entre eles, dados de U em rochas e solos, dados de  $Rn_{222}$  nos solos e dados de  $Rn_{222}$  no ar dentro de habitações. Em Salgado et al. (1998) e Salgado (2000) é possível encontrar dados e



parâmetros estatísticos básicos, relativos a concentrações de urânio e tório. Estes serão analisados em pormenor mais à frente. Mais recentemente, também em Lamas et al. (2015), Miranda et al. (2015) e Lamas et al. (2017) foram publicados mais dados estatísticos, de componentes radiológicas, relativos a litótipos de interesse. Muito provavelmente parte dos dados amostrais sobrepõe-se entre estes trabalhos, acomodando novos dados obtidos. De notar que nestes últimos estudos (Lamas et al. (2015), Miranda et al. (2015) e Lamas et al. (2017)) o Granito de Tondela não foi amostrado, mas sim rochas de litologia análoga, geograficamente distantes, ao contrário do Granito de Tábua, que foi amostrado, geograficamente perto da área de interesse.

O Granito de Tondela apresenta um teor médio de Urânio (média aritmética) entre 5,5 e 7,9 ppm (tabela 8). O Granito de Tábua tem um teor médio de U entre 8,2 e 11,7 ppm. Destes dados é possível concluir que o Granito de Tondela tem tendencialmente menor concentração de urânio do que o Granito de Tábua. Ainda assim, ambos os teores médios encontram-se significativamente acima da concentração de U média crustal, de 2,8 ppm (Taylor & McClennan, 1985), bem como da grande maioria dos granitos. Mesmo o valor médio mais baixo apresentado em Pereira et al. (2002), de 4,8 ppm no Granito de Figueiró dos Vinhos, representa um enriquecimento duplo da média crustal.

Tabela 8 - Teores médios de Urânio dos litótipos de interesse, apresentados nos estudos de Pereira et al. (2002), Lamas et al. (2015) e Lamas et al. (2017). n – número de amostras consideradas; (-) – desconhecido;

	Pereira et al. (2002)		Lamas et al. (2015)		Lamas et al. (2017)	
	n	U (ppm)	n	U (ppm)	n	U (ppm)
GT	14	7,9	(-)	6,9 ± 1,5	10	5,5 ± 2,4
GTB	68	11,7	(-)	9,9 ± 4,2	74	8,2 ± 4,0

Os granitóides sin-D3 apresentam valores médios de U mais baixos do que os granitóides tardi-pós-D3 (Miranda et al., 2015). Em Lamas et al. (2015) é possível verificar que os granitóides tardi-pós-D3 do maciço de Braga apresentam valores médios francamente mais baixos do que os seus litologicamente análogos do Batólito das Beiras (Granito de Tábua). Daqui, torna-se evidente a insuficiência da cartografia geológica a uma escala tão ampla para correlacionar os dados radiológicos e a geologia, bem como a importância de variáveis locais no condicionamento radiológico.

Técnicas de *fission track* (Pereira et al., 2002) permitiram mostrar que o U no Granito de Tábua tem tendência a ocorrer em microfissuras, clivagens e na bordadura, de minerais de biotite. Tal disposição potencia a sua mobilidade, bem como a emissão de Rn<sub>222</sub> (Sakoda

et al., 2011). Já no Granito de Tondela, o U tende a ocorrer na rede estrutural de cristais de apatite e zircão, dificultando quer a sua mobilidade quer a emissão de radão (Pereira et al., 2002). É de esperar que no Granito de Tondela, a meteorização se revele uma variável de grande peso no que respeita a emissão do gás radão, condicionando fortemente as concentrações deste gás dentro de habitações.

Materiais de caixas de falhas representam sempre uma anomalia do fundo radiométrico, mas de grande variabilidade – entre dezenas de ppm e milhares de ppm de U. Assim como, alguns filões e rochas metassedimentares, nas auréolas de metamorfismo de contacto ou em encraves, também representam anomalias (Pereira et al., 2002).

No que respeita a radão nos solos, como seria de esperar, os dados são concordantes com os dados de urânio nas rochas. Também o Granito de Tábua apresenta o valor médio (média geométrica) de Rn mais elevado – 52 kBq.m<sup>-3</sup> (n = 152). Já o Granito de Tondela apresenta um valor médio de 29 kBq.m<sup>-3</sup> (n = 51). Neste parâmetro, mais uma vez as falhas apresentam-se como fortes anomalias ao fundo radiométrico, onde frequentemente são medidos valores de radão nos solos superiores a 100 kBq.m<sup>-3</sup> (Pereira et al., 2002). Medições efetuadas ao longo de perfis perpendiculares a estas estruturas indicaram: a grandeza das anomalias, cujos valores podem ser dezenas de vezes superiores aos valores do fundo radiométrico; e o carácter localizado da anomalia, que num curto espaço retoma os valores do fundo radiométrico (Pereira et al., 2002; 2010). Também as rochas metassedimentares, nas auréolas de metamorfismo de contacto e nos encraves, apresentam fortes anomalias, por vezes superiores a 1 000 kBq.m<sup>-3</sup> (Pereira et al., 2002).

Quanto aos dados de radão em habitações, medidos durante o inverno, mais uma vez o padrão é mantido. O Granito de Tábua apresenta o maior valor médio (média geométrica) de concentração da atividade de radão no ar, dentro de habitações – 280 Bq.m<sup>-3</sup> (n = 390). O Granito de Tondela tem um valor médio de 120 Bq.m<sup>-3</sup> (n = 79). As rochas metassedimentares que se encontram afetadas por metamorfismo de contacto têm um valor médio de 240 Bq.m<sup>-3</sup> (n = 30), que reflete novamente uma anomalia dentro do grupo dos xistos e metagrauvaques (Pereira et al., 2002).

No trabalho de Pereira et al. (2002) é ainda referido que o grupo dos metassedimentos (n = 68), apresenta um valor médio de concentração de Rn em habitações (70 Bq.m<sup>-3</sup>) mais elevado do que os sedimentos detríticos (50 Bq.m<sup>-3</sup>, com n = 82). Enquanto nas propriedades químicas descritas anteriormente eram os sedimentos que apresentavam valores médios mais elevados, inclusive próximos do valor médio de alguns outros granitos (90 Bq.m<sup>-3</sup>). Destas relações, os autores apresentam duas conclusões: em primeiro lugar, a litologia não é suficiente para caracterizar o risco do gás radão para a saúde pública, pois quimicamente existe muita variabilidade (como granitos com pouco urânio); em segundo lugar, a componente estrutural tem um grande impacto nas concentrações de radão em habitações -

como referido anteriormente a nível microscópico, o suporte mineralógico do urânio, como também à escala das formações, sendo que os sedimentos detríticos apresentam uma estratificação horizontal que atenua o fluxo vertical do gás, enquanto nos metassedimentos a estratificação sub-vertical favorece esse mesmo fluxo.

## 4. DADOS, MÉTODOS E TÉCNICAS

---

Este trabalho beneficiou da informação prévia e obtida nas duas áreas em estudo, parcialmente publicada nas referências já atrás citadas; inclui ainda dados não publicados e que foram disponibilizados pelo Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra em resultado de campanhas levados a cabo na última década. A integração numa base de dados geográfica e o manuseamento espacial dos dados foi executado no sistema de informação geográfica (SIG), ArcGIS. Outro tipo de manuseamentos de dados foram também efetuados com recurso à linguagem R (R Core Team, 2019), através do Ambiente de Desenvolvimento Intergrado (IDE), *open-source*, RStudio (RStudio Team, 2019).

### 4.1 Dados disponibilizados

Para o estudo da área de Tondela, foram reunidos numa base de dados os dados de sete variáveis distintas: (i) radiação  $\gamma$  (gama) total; (ii) concentrações de atividade de radão nos solos; (iii) concentrações de atividade de radão na água; (iv) urânio em amostra; (v) tório em amostra; (vi) atividade de potássio-40 em amostra; (vii) concentrações de atividade de radão em habitações. Estas variáveis estão contidas em seis conjuntos de dados, em tabelas com representação espacial. Para o estudo da área de Oliveira do Hospital, foram reunidas três variáveis: (i) radiação  $\gamma$  total; (ii) concentrações de atividade de radão nos solos; (iii) concentrações de atividade de radão nas habitações. Estas variáveis estão contidas essencialmente em três conjuntos de dados, em tabelas com representação espacial. Os dados de radiação  $\gamma$  total, nesta região, provêm de várias fontes, com escalas de aquisição de dados distintas.

#### *4.1.1 Radiação gama total*

Os dados de radiação  $\gamma$  total disponíveis para a área de Tondela, foram obtidos por Salgado (2000). A aquisição dos dados consistiu no levantamento de 540 perfis radiométricos, de extensão variável, que perfazem um total coberto de 87,5 km lineares. Nestes foram recolhidos 694 dados sobre as diferentes litologias aflorantes.

O levantamento consistiu na medição sequencial de valores ao longo de perfis longitudinais com extensão variável e caracterizados por um valor médio, atribuído ao ponto central do perfil. Caso fosse registada uma anomalia de pequena extensão, no interior de um perfil contínuo e estável, esse valor era registado no mesmo perfil como valor anómalo. Para

os depósitos sedimentares, dada a natureza deposicional dos mesmos e consequente diferenciação radiológica, o levantamento dos perfis inclui também a variabilidade vertical.

Para a região de Oliveira do Hospital, os dados de radiação  $\gamma$  total resultam de três campanhas distintas. A uma escala regional, de 1:25 000, os dados utilizados são propriedade da Empresa Nacional de Urânio (ENU), nunca publicados. Esta aquisição segue uma metodologia distinta da seguida nas restantes escalas de aquisição. A ENU tinha como objetivo a prospeção de minérios passíveis de exploração, caracterizados pela ocorrência de anomalias radiométricas, e por esse motivo não era feita a caracterização da área adjacente à anomalias. Seguindo uma metodologia semelhante à seguida em Tondela, eram varridos perfis com um cintilómetro de raios gama, a pé ou de carro. Contudo, apenas as anomalias eram registadas, sendo que as áreas, cartografadas pela ENU, onde não existem anotações de anomalias pode deduzir-se que os valores são os normais para o fundo radiológico. Esta metodologia cobriu não só a área de estudo, como uma boa porção da zona centro de Portugal, para lá das áreas que já se encontravam em exploração.

Os dados disponibilizados pela ENU sobre a localização e intensidade das anomalias, á escala 1: 25 000, orientaram trabalhos de pormenor realizados posteriormente (por exemplo, escala de 1:2 000), como os descritos em Pereira et al. (2010). Nestes trabalhos procuravam-se os fatores geológicos responsáveis pela distribuição do gás radão, em particular, nos solos, concluindo-se uma estreita dependência para com falhas com expressão espacial significativa. No trabalhosupracitado integraram-se dados obtidos na região de Oliveira do Hospital, em três sectores distintos, localmente conhecidos como Nogueira do Cravo (sector A), Senhor das Almas (sector B) e a Vale da Baguinha (sector C) (figura 10).

Em Pereira & Neves (2012), foram obtidos dados segundo grelhas regulares de 5 x 5 m, a uma escala 1:1 000, em zonas de falhas e/ou encraves com enriquecimento em U, identificadas anteriormente. Foram também três os sectores estudados: o Senhor das Almas (sector B), Vila da Baguinha (sector C) e Chão do Prado (sector D) (figura 10).

Para qualquer uma das áreas, o método de medição consiste na colocação do detetor do aparelho a uma distância de aproximadamente 10 cm, da superfície do material rochoso (Salgado, 2000). Isto porque, o valor medido representa apenas cerca de 50 cm superficiais de rocha, sendo que 75% provém apenas dos 20 cm mais superficiais (Akerblom, 1994; International Atomic Energy Agency (IAEA), 2013).

As medições foram efetuadas com um cintilómetro de campo, da *Saphymo* (atual *Bertin Instruments*), modelo SPP2 (descontinuado em 2018). O detetor deste equipamento consiste num cristal de Iodeto de Sódio, com ativador de Tálcio (NaI (TI)), com dimensões de 3,81 cm x 2,54 cm. Este cristal (cintilador), quando é atingido por radiação ionizante, como os raios  $\gamma$ , absorve a sua energia e emite fótons de baixa energia (cintilação). Esse feixe de luz é direcionado a um tubo fotomultiplicador, que é responsável, ao seu final, por um pulso

elétrico mensurável. Obtém-se assim um sinal, proveniente de um grupo de fótons, que corresponde a um único “choque”, de uma única partícula ionizante. A leitura da medição é expressa em função do tempo, por choques por segundo (cps). O erro deste equipamento, determinado pelo fabricante, é de 10% para temperaturas até aos 20 °C e de 20% para temperaturas mais elevadas.

Os cintilómetros como o SPP2, ao contrário dos espectrómetros, não diferenciam energias, pelo que não é possível saber a contribuição de cada isótopo. Por isso se designa de radiação  $\gamma$  total. Também não é possível converter diretamente os choques por segundo em unidades de exposição ( $C \cdot kg^{-1}$ ) ou unidades de dose absorvida e equivalente ( $Gy$  e  $Sv$ , respetivamente). No entanto, os choques por segundo permitem interpretar comparativamente a contribuição radiológica de cada material.

Como o decaimento radioativo é um fenómeno aleatório, os valores medidos não devem resultar de um valor instantâneo. O operador do instrumento de medição permanece na mesma medição por um intervalo de tempo, suficiente para limitar um intervalo de variação dos valores e anotar o valor médio. Este aspeto, associado também à escala do aparelho, faz com que os valores medidos sejam valores médios e arredondados às dezenas, com uma tendência natural para classes de 50 choques por segundo.

Para a área de Oliveira do Hospital, foi possível recuperar toda a informação disponível obtida a várias escalas, num total de 1775 dados. Na área de Tondela, na transposição dos dados para SIG, foram recuperados 670 dados (96,5%). Os dados perdidos devem-se a:

- Um ponto sem coordenadas;
- Dois pontos com coordenadas mal introduzidas (provavelmente erros de digitação, na digitalização original dos dados);
- 21 pontos adquiridos fora da área de trabalho;

Na base de dados, o conjunto mais completo é o de radiação gama total, quer para a região de Tondela, quer para a região de Oliveira do Hospital. Pela sua dimensão e dispersão, foi o único conjunto de dados ao qual foi possível aplicar técnicas de análise geoespacial, de modo a interpolar valores, a partir dos valores medidos, e criar um mapa completo para a área de estudo.

#### *4.1.2 Elementos radiogénicos*

Os dados de geoquímica das rochas para a área de Tondela foram retirados de Salgado (2000) e de Pereira (1991), perfazendo um total de 79 amostras analisadas na área

de estudo. As metodologias aplicadas para colheita, moagem, homogeneização e seleção dos materiais podem ser consultadas nos manuscritos supracitados.

No trabalho de Salgado (2000) a colheita de amostras foi direcionada em dois sentidos: amostragem das litologias e amostragem de caixas de falhas a interseção dessas litologias, correspondentes às anomalias radiométricas, tendo sido obtidos dados de U, Th e K<sub>2</sub>O. Para o caso do potássio, no entanto, os dados de Salgado (2000) não se encontram publicados, pelo que apenas existem dados para 6 amostras. Estes foram convertidos em <sup>40</sup>K de acordo com a equação:

$${}^{40}\text{K}(\%) = \frac{\text{K}_2\text{O}(\%)}{100} \times \frac{2 \times M(\text{K})}{M(\text{K}_2\text{O})} \times \frac{0,0117\%}{100} \times 100 \quad (3)$$

M – Massa molar

0,0117% é a abundância natural de <sup>40</sup>K

Dados os valores relativamente baixos de potássio-40, estes foram convertidos em unidades de atividade, por quilograma de amostra:

$${}^{40}\text{K}(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{ de amostra}) = \frac{{}^{40}\text{K}(\%)}{100} \times s (\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (4)$$

s – atividade específica, dada por  $s = \frac{\text{taxa de decaimento}}{\text{massa do isótopo}}$ .

Para o <sup>40</sup>K,  $s = 2,6 \times 10^8 (\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})$  (UNSCEAR, 2008)

### 4.1.3 Concentrações de atividade de radão no solo

Os dados de concentração de atividade de radão no solo, disponíveis para a área de Tondela, foram obtidos por Salgado (2000). Neste trabalho, após a aquisição inicial de dados de radiação  $\gamma$  total, foi efetuada uma campanha para aquisição de dados sobre a concentração de atividade de radão em solos, direcionada, em particular, para os locais onde foram identificadas anomalias, associadas em geral a caixas de falhas.

Para a região de Oliveira do Hospital os dados obtidos são de Pereira et al. (2010), a que se acrescentaram mais dados de alguns perfis, obtidos numa outra campanha, pelos mesmos autores (dados não publicados). Esta informação foi objeto já de um tratamento prévio, pelo que no presente trabalho não será realizada uma análise tão intensiva, ao contrário do que aconteceu com os dados de Tondela. Procurava-se então demonstrar a influência das falhas na variabilidade, mesmo numa escala pequena, das concentrações de atividade de radão no solo. O trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende dar continuidade precisamente às conclusões e propostas do trabalho de Pereira et al. (2010).

Como expresso no capítulo 2, até hoje não existe uma metodologia que seja consensual para medição da concentração de gás radão em solos. Em Salgado (2000) e em Pereira et al. (2010) foi utilizado um contador de cintilações, o *Radon Detector* RD200, acoplado a uma célula de Lucas. É efetuado previamente um furo de pequeno diâmetro (20-

22 mm), com recurso a martelo pneumático, devido à elevada resistência, em geral, do material na superfície topográfica. Os furos foram efetuados até uma profundidade de cerca de 80 centímetros, profundidade essa padronizada para estudos de avaliação do potencial geogénico de radão. Para esta profundidade, reconhece-se que a influência dos fatores meteorológicos é reduzida, verificando-se alguma estabilidade nos valores em séries temporais (Neznal et al. (2004)). É introduzida uma sonda nesses buracos e, com apoio de uma bomba manual ou de fluxo constante, o ar do solo é conduzido para o interior da célula de Lucas. Esta possui o seu interior revestido a sulfureto de zinco, ativado com prata, ZnS(Ag), que, quando em contacto com uma partícula  $\alpha$ , produz um fotão (cintilação). O processo analógico é semelhante ao descrito no capítulo 4.1.1. No percurso do gás, desde o solo até à célula de Lucas, existe um filtro de partículas sólidas, para remoção do pó bem como dos descendentes sólidos do gás radão e ainda um filtro desumidificador.

É possível separar a contribuição do gás torão, também presente nos solos, tendo em conta os tempos de meia-vida significativamente distintos. Com três medições sucessivas, de um minuto cada, obtém-se as contagens por minuto do  $^{222}\text{Rn}$ , através da equação:

$$CPM_{^{222}\text{Rn}} = 0,87 \times C_3 + 0,32 \times C_2 - 0,34 \times C_1 \quad (\text{Morse, 1976}) \quad (5)$$

CPM – contagens por minuto

$C_i$  - contagens no intervalo de tempo  $i$  (um minuto)

Para os dados de radão nos solos, foram aplicadas também técnicas de análise espacial e interpolação, mas apenas áreas (setores) com informação disponível de grande detalhe: o propósito desta opção foi evitar que a densidade de pontos fosse inconsistente ao longo da área modelada.

#### 4.1.4 Concentrações de atividade de radão no interior de habitações

Os dados de concentrações de atividade de radão no interior de habitações, para ambas as regiões, são propriedade do Laboratório de Radioatividade Natural (LRN) da Universidade de Coimbra. Por questões de privacidade e proteção de dados, ao longo desta dissertação a localização exata dos detetores nunca será indicada.

Os dados de Tondela pertencem a uma campanha realizada em 2015 pelo LRN. As habitações analisadas foram escolhidas de forma a coincidirem com as que integraram uma outra campanha realizada na região de Tondela, em 2005, também pelo LRN. Os dados de Oliveira do Hospital foram obtidos em 2005. Todos os dados foram obtidos durante o inverno-início da primavera.

Foram utilizados detetores passivos, no estado sólido, de traços nucleares (SSNTD – *Solid State Nuclear Track Detector*) (Choppin et al., 2002). O detetor utilizado é uma pequena película (1 cm x 1 cm) de um tipo de polímero de plástico específico, capaz de registar os



choques produzidos pelas partículas  $\alpha$ . Este polímero é um *allyl diglycol carbonate* (carbonato de polialildiglicol), vulgar e comercialmente conhecido por CR-39. O detetor encontra-se dentro de uma câmara cilíndrica, de plástico, com não mais do que 5,5 cm de altura e 1,5 cm de raio. A entrada do ar nesta câmara é limitada, para que não entrem os produtos de decaimento do  $^{222}\text{Rn}$  em suspensão, gerados no exterior da câmara, e para diminuir o fluxo de entrada, para que o gás  $^{220}\text{Rn}$  decaia no exterior da câmara e apenas o  $^{222}\text{Rn}$  entre.

Para aumentar a dimensão dos traços provocados pelas partículas  $\alpha$  é necessária efetuar uma revelação química dos detetores. Esta consiste num banho de solução a 25% de NaOH (hidróxido de sódio), a 90° C constantes, por quatro horas e meia e subsequente neutralização, tudo no equipamento *RadoBath* (*Radosys Ltd.*). A contagem dos traços foi efetuada, de forma automatizada, pelo equipamento *Radometer 2000* (*Radosys Ltd.*).

Os dados de Tondela correspondem a um total de 50 habitações amostradas, dentro da área em estudo: 35 (70%) dados adquiridos em rés-do-chão e 15 (30%) dados adquiridos em 1<sup>os</sup> andares. A georreferenciação destes dados inseriu-se na recente georreferenciação da antiga base de dados de detetores de radão do LRN (apenas habitações), pelo autor desta dissertação.

Os dados de Oliveira do Hospital correspondem a um total de 76 habitações amostras, dos quais 83% foram obtidos em rés-do-chão e 17% em 1<sup>os</sup> andares. Estes dados já se encontravam georreferenciados, mas sem informações relativas ao andar. Estas informações foram recuperadas da base de dados do LRN.

Para a filtragem dos dados foi utilizada a linguagem R e a informação das moradas resultantes dessa mesma filtragem foi submetida ao processo de *geocoding*, em ambiente ArcGIS.

## 4.2 Métodos e técnicas aplicados aos dados disponibilizados

As metodologias adotadas nesta dissertação não seguiram uma ordem sequencial predeterminada. O processo de investigação foi dinâmico. A cada novo cenário do desenvolvimento, colocava-se a hipótese de aplicar um novo leque de metodologias. Por esse motivo, a ordem pela qual são aqui apresentadas não reflete necessariamente uma ordem a seguir na aplicação de metodologias semelhantes, a outras regiões, nem inclusive reflete estritamente a ordem pela qual foram aplicadas nesta dissertação.

### 4.2.1 *Análise de dados e testes estatísticos de significância*

A análise de dados foi efetuada com recurso a R, versão 3.6.1 (R Core Team, 2019), implementada através do Ambiente de Desenvolvimento Intergrado (IDE), *open source*,

RStudio. R é uma linguagem de programação, especialmente desenvolvida para computação estatística e gráficos. Face ao programa Excel, a linguagem de programação é muito mais versátil e oferece-nos o controlo até ao mais pequeno detalhe. Para além disso, a grande vantagem é o acesso a uma vasta opção de processamentos, para os quais o Excel não oferece uma ferramenta. Para além dos pacotes do núcleo de R, há a realçar a utilização do pacote “*tidyverse*” (Wickham et al., 2019).

É frequente que os fenómenos de radioatividade natural sejam descritos por uma distribuição aproximadamente log-normal (distribuição de Galton). Nesta distribuição, embora a variável  $X$  não possua uma distribuição normal, o logaritmo de  $X$  encontra-se distribuído normalmente,  $\log(X) \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Para avaliar a log-normalidade das distribuições recorreu-se à transformação logarítmica dos dados originais (ou transformação logarítmica da escala dos eixos). A representação gráfica que melhor evidencia o ajuste de uma distribuição empírica a uma distribuição normal teórica (ou log-normal), são os gráficos Quantil-Quantil (gráfico Q-Q).

Para além de parâmetros estatísticos básicos sumariados em função de grupos, foram efetuados com frequência testes estatísticos de significância. Por questões de frequente desvio à normalidade (ou log-normalidade) das distribuições, ou por défice frequente de amostragem em alguns grupos, optou-se por utilizar sempre testes não paramétricos. A validade desta família de testes não depende de premissas que assumam um tipo de distribuição de probabilidades.

Entre os vários métodos utilizados encontram-se:

- Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney: (compara a menor das somas dos postos (*rankings*), para cada variável, das observações ordenadas das variáveis, com a distribuição do estatístico  $U$ , assumindo a hipótese nula)<sup>4</sup>
  - $H_0$ : Existe igual probabilidade de uma observação da variável  $X$  exceder ou ser excedida por uma observação da variável  $Y - P(X_i > Y_i) = \frac{1}{2}$  – não existe dominância estocástica de uma das variáveis sobre a outra;<sup>5</sup>
  - $H_a$ : A probabilidade de uma observação da variável  $X$  exceder uma observação da variável  $Y$  é diferente da probabilidade de uma

<sup>4</sup> O estatístico  $U$  do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney pode ser calculado de duas maneiras distintas: ou apenas é considerada a menor das somas dos postos, para cada variável, das observações ordenadas das variáveis, ou a essa soma é subtraído o menor valor possível da soma dos postos para o número de observações dessa variável ( $n_X \cdot \frac{(n_X+1)}{2}$ , com  $n$  igual ao número de observações da variável  $X$ ). Os resultados, embora semelhantes, não deixam de ter pequenas discrepâncias (R Core Team, 2019).

<sup>5</sup> O teste Wilcoxon-Mann-Whitney pode também ter várias interpretações. A formulação da hipótese nula mais generalizada e que dá resposta a qualquer teste efetuado, é a descrita acima. Contudo a hipótese nula mais frequentemente utilizada e mais simples é “ $H_0$ : As duas distribuições provêm de uma mesma distribuição”. Noutros casos específicos (e por vezes aplicada de forma errada), em que é possível afirmar que a variância e assimetria das duas distribuições é igual, a hipótese nula,  $H_0$ , pode assumir que as medianas são iguais.

observação da variável Y exceder uma observação da variável X –  $P(X_i > Y_i) \neq \frac{1}{2}$  – existe dominância estocástica de uma das variáveis sobre a outra;

- Teste de Kruskal-Wallis: (é uma extensão do teste Wilcoxon-Mann-Whitney a vários grupos)
  - $H_0$ : Não existe dominância estocástica de uma das variáveis sobre as restantes;
  - $H_a$ : Existe dominância estocástica de pelo menos uma das variáveis sobre as restantes;
- Teste de Kolmogorov-Smirnov: (compara a maior diferença entre duas funções de distribuição cumulativa com valores tabelados)
  - $H_0$ : As duas distribuições provêm de uma mesma distribuição;
  - $H_a$ : As duas distribuições não provêm de uma mesma distribuição;

Entre o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney e o teste de Kolmogorov-Smirnov, foi dada preferência ao primeiro, mesmo que por vezes tenham sido feitos ambos os testes. O teste de Kolmogorov-Smirnov não só é sensível a deslocamentos da distribuição, como o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, bem como é sensível a diferenças na forma e na dispersão da distribuição, o que faz deste um teste mais robusto. Contudo, o teste de Kolmogorov-Smirnov não lida bem com valores “empatados” (tradução literal do inglês “*ties*”), que é característico dos dados de radiação  $\gamma$  total. Embora a variável seja contínua, a natureza do fenómeno de decaimento radioativo faz com que os valores tendam normalmente para valores em classes de 50 choques por segundo, ainda que a variável não seja categórica. Isto dá origem a uma grande quantidade de dados com exatamente o mesmo valor medido (valores “empatados”, quando os dados são ordenados).

Para reportar os resultados de cada teste estatístico, em texto, foi dada preferência à utilização do valor-p, pela facilidade de apenas ser necessário reportar um valor. O valor-p é a probabilidade de obter um estatístico dos dados, igual ou mais extremo do que o calculado, assumindo a hipótese nula como verdadeira (Wasserstein & Lazar, 2016). Quanto menor o valor-p, sob as mesmas premissas e dados, maior a incompatibilidade entre os dados observados e a hipótese nula (Wasserstein & Lazar, 2016). Assim fornecem indicações para que seja aceite ou se rejeite a hipótese nula, para um determinado nível de significância  $\alpha$ . Em todo o decorrer desta dissertação optou-se por considerar um nível de significância,  $\alpha$ , constante, de 5% (intervalo de confiança de 95%), como um bom compromisso entre erros do tipo-I e erros do tipo-II. Os valores-p apenas fornecem indicações relativas aos dados observados, admitindo a hipótese nula como verdadeira, mas nada nos dizem sobre a veracidade da hipótese em si (Wasserstein & Lazar, 2016).

No caso de famílias de comparações múltiplas, como a resultante do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney por pares, em algumas ocasiões foi relevante a correção dos valores-p. No estudo destes testes múltiplos (simultâneos), ao admitir um erro do tipo-I de 5%, para cada comparação entre grupos, sem correção, os erros do tipo-I multiplicam-se. Isto leva a que o erro “geral” (da família de comparações), do tipo-I, seja significativamente superior aos 5% admitidos. Nem todas os cenários de comparações múltiplas implicam necessariamente a correção dos valores-p. O método escolhido para as correções foi o de Holm (1979). A escolha deste método em específico baseia-se no facto de ser uma alternativa simples e generalizada ao método original de Bonferroni, que se revela muito conservador (R Core Team, 2019).

#### *4.2.1.1 Simulação do fundo regional de radiação gama total para a região de Oliveira do Hospital*

Para ser possível interpolar a radiação gama total para a área de estudo, face à cartografia da ENU, apenas com o registo das anomalias, é necessário simular os valores de fundo regional. A metodologia aqui proposta só é válida pelo elevado grau de confiança na cartografia da ENU, na qual foram identificadas todas as anomalias existentes à escala regional (1:25 000).

Os setores estudados (sA, sB e sC, figura 11) a uma escala de pormenor incorporam não só a distribuição das anomalias, como também do fundo radiológico (Pereira et al., 2010). Por esse motivo, a proposta de metodologia foi a seguinte:

1. Testar que os diferentes setores ( $\{sA, sB, sC\}$ ) podem constituir uma distribuição única ( $X = \{sA, sB, sC\}$ ) (teste de Kruskal-Wallis), garantindo que os fundos regionais podem fazer parte de uma mesma distribuição de dados, bem como as anomalias, quer em metassedimentos, quer em caixas de falhas a interseção granitos. Caso o teste indique que deve ser aceite a hipótese nula, então a metodologia pode seguir.
2. Em função da distribuição dos dados, definir a separação entre o fundo regional e as anomalias ( $X = X'(Fundo regional) + A(anomalias)$ ).
3. Retirar da distribuição os dados correspondentes às anomalias ( $X' = X - A$ ) e calcular os parâmetros estatísticos básicos da distribuição da nova variável,  $X'$ .
4. Simular um conjunto de valores ( $S$ ) que sigam uma distribuição logarítmica normal (utilizando a função “*rlnorm()*” em R (R Core Team, 2019)), com os parâmetros calculados, nomeadamente a média dos logaritmos e o desvio padrão dos logaritmos. Em percentagem, a quantidade de valores a simular ( $\%(S)$ ) deve corresponder à percentagem de valores considerados como fundo

regional dos dados totais dos setores ( $\%(X') = 100\% - \%(A)$ ). Pelo que  $S = \frac{R(\text{n}^\circ \text{ de anomalias regionais}) \times 100}{\%(A)} - R(\text{n}^\circ \text{ anomalias regionais})$ .

5. Calcular um *raster* da densidade espacial dos pontos das anomalias à escala regional, com a ferramenta “*Kernel Density*”, da extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS, e recalcular para obter um *raster* de probabilidades.
6. Utilizar o inverso do *raster* calculado como *raster* de probabilidades de inclusão, para criar pontos aleatórios no espaço com a ferramenta “*Create Spatially Balanced Points*”, da extensão “*Geostatistical Analyst*” do ArcGIS, aos quais são atribuídos os valores calculados em (4).

Os valores simulados foram todos arredondados às dezenas, para manter o padrão dos dados adquiridos (limite mínimo de diferenciação encontrado).

#### 4.2.2 *Análise geoespacial e interpolação*

Para a análise espacial, foi utilizada a extensão *Geostatistical Analyst*. Esta inclui ferramentas de análise espacial de dados, que foram utilizadas para uma breve exploração dos dados. Nomeadamente, as ferramentas *Trend Analysis* e *Semivariogram/Covariance Cloud* e, em especial, o conjunto de ferramentas *Geostatistical Wizard*.

A documentação relevante, para todas as ferramentas que podem ser utilizadas, pode ser consultada no site da ESRI (2019). (<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm> e hiperligações aqui encontradas).

Pelo princípio básico de quase a totalidade dos métodos de interpolação, é expectável que pontos próximos sejam mais semelhantes entre si, do que pontos separados por maiores distâncias. A principal mudança entre métodos é como é calculado o peso a atribuir, a cada ponto conhecido, na vizinhança do ponto que se pretende estimar. Neste trabalho foram investigados dois métodos: um geoestatístico – o Kriging Ordinário (KO) – e um determinístico – o Inverso da Potência das Distâncias (IPD). Contudo, face aos bons resultados que o método geoestatístico apresentou, como se trata de um método bastante mais robusto, o método IPD acabou por ser colocado de parte.

##### 4.2.2.1 *Kriging Ordinário (KO)*

Para os métodos de kriging, é assumido que cada ponto representa uma realização possível,  $z(x_i)$ , de uma variável aleatória  $Z(x_i)$ . É também assumido que existe correlação entre as  $N$  variáveis aleatórias,  $Z(x_0), Z(x_1), \dots, Z(x_i)$ . No entanto, é matematicamente impossível descrever uma distribuição de uma variável aleatória com uma única realização

dessa variável. Por isso é assumida a estacionariedade do primeiro e do segundo momento das distribuições: a média das variáveis aleatórias é estacionária e a covariância entre pares,  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ , separados da mesma distância,  $h$ , também é estacionária. A variável aleatória pode ser descrita por  $Z(x_i) = \mu + \varepsilon(x_i)$ , com  $\mu$  a ser a tendência central e com  $\varepsilon(x_i)$  a componente aleatória local, que depende de  $h$ .

Do disposto, chega-se às duas definições complementares:

- O variograma:

$$2\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{|N(h)|} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (6)$$

$2\hat{\gamma}(h)$  – Variograma;

$|N(h)|$  – Número de pares, separados pela distância  $h$ ;  $z(x_i) - z(x_i + h) = z(x_i + h) - z(x_i)$ ;

- O covariograma:

$$C(h) = \frac{1}{|N(h)|} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) \cdot z(x_i + h)] - m^2 \quad (7)$$

$C(h)$  – Covariância;

$|N(h)|$  – Número de pares, separados pela distância  $h$ ;  $z(x_i) - z(x_i + h) = z(x_i + h) - z(x_i)$ ;

$m$  – Valor expectável (média) da variável  $Z(x_i)$ :  $E[Z(x_i)] = E[Z(x_i + h)]$ ;

O covariograma relaciona-se com o semivariograma por:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (8)$$

$\gamma(h)$  – Semivariância para a distância  $h$ ;

$C(0)$  – Variância para  $h$  igual a zero;

$C(h)$  – Covariância para a distância  $h$ ;

Da equação 8 conclui-se que é igualmente válido ajustar um modelo a um covariograma ou um semivariograma. Contudo essa validade é condicionada pela assunção de estacionariedade de segunda ordem. Existem também casos onde o semivariograma é definido e o covariograma não. Em Cressie (1993), da página 67 à 73, são apontados alguns desses aspetos. Contudo, muitos dos aspetos mencionados não inviabilizam o método. Existem autores, como por exemplo Isaaks & Srivastava (1989) e Srivastava & Parker (1989), citados em Curriero et al. (2002), que defendem que a utilização do covariograma é um método mais robusto em alguns casos específicos. Nomeadamente quando “os dados exibem heteroscedasticidade, assimetria ou amostragem preferencial” (Curriero et al., 2002). Como será visto na continuidade desta dissertação, os dados a interpolar apresentam todas estas características. Dada a complexidade matemática e extensão da discussão, direciono para uma leitura mais completa das referências supracitadas. Para outro tipo de detalhes sobre as

bases da metodologia do kriging, direciono o leitor para os trabalhos de Clark (2001) e Landim (2006).

No caso do KO a média é desconhecida e apenas é assumida uma estacionariedade no espaço de vizinhança<sup>6</sup> do ponto a interpolar. Para os casos em que existe uma tendência regional, pode ser utilizado o método de Kriging Universal, mais complexo, ou efetuar uma correção de tendência. Nesta dissertação optou-se pela última opção, uma vez que o método KO é o mais simples e por isso muito flexível nas suposições que têm de ser feitas. Nomeadamente que a distribuição do fenómeno é normal.

Para a validação cruzada dos modelos construídos, foi utilizado o sistema de remoção de um dado à vez, conhecido por método “*leave-one-out*” (“deixar um de fora”). Consiste na estimação do valor,  $\hat{Z}(x_i)$ , com o modelo proposto, para um ponto amostrado, com base nos restantes pontos. O erro é a diferença entre o valor medido,  $z(x_i)$ , e o valor estimado  $\hat{Z}(x_i)$ :

$$Er(x_i) = \hat{Z}(x_i) - z(x_i) \quad (9)$$

O processo é repetido N vezes, para cada ponto amostrado que existe. Após esta série de processamentos, são calculados os seguintes parâmetros (Esri, 2019b):

$$\text{Erro médio:} \quad \frac{\sum_{i=1}^N Er(x_i)}{N} \quad (10)$$

$$\text{Erro quadrático médio:} \quad \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Er(x_i))^2}{N}} \quad (11)$$

$$\text{Erro médio padronizado:} \quad \frac{\sum_{i=1}^N Er(x_i)/\sigma(x_i)}{N} \quad (12)$$

$$\text{Erro quadrático médio padronizado:} \quad \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Er(x_i)/\sigma(x_i)]^2}{N}} \quad (13)$$

$$\text{Erro padrão médio:} \quad \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sigma^2(x_i)}{N}} \quad (14)$$

Na avaliação dos erros estimados é importante considerar três aspetos: o enviesamento das previsões, a otimização do modelo e a validade da incerteza calculada (Esri, 2019b; 2019a). Um erro médio padronizado perto de zero indica que os erros dos valores interpolados não estão enviesados. A otimização do modelo é indicada por um erro quadrático médio o mais baixo possível. Contudo, só quando este é comparado com o erro padrão (valores próximos) é que é validada a variabilidade assumida no modelo. O erro quadrático médio padronizado sumaria essa comparação, entre a variabilidade estimada no modelo (erro padrão) e a variabilidade observada (erro quadrático médio). Um valor de um

<sup>6</sup> O espaço de vizinhança é o espaço definido pelo raio (ou pelos eixos em caso de anisotropia) de procura de pontos vizinhos a utilizar, para o cálculo da estimativa do valor no ponto a interpolar.

indica que não existe enviesamento da variabilidade. Um valor superior a um indica a sobestimação da variabilidade e um valor inferior a um indica a sobrestimação da variabilidade.

A escolha dos dados a utilizar e dos métodos a aplicar foi um processo iterativo, com ajustes constantes. Tal é característico da metodologia de análise espacial. Não existe uma metodologia ou uma fórmula única. As escolhas recaem sobre a pessoa que se encontra a modelar e devem, na medida do possível, ser justificadas pelas características do processo em modelação. Por este motivo, torna-se impossível demonstrar e/ou descrever aqui todo esse processo, pelo que serão apresentados apenas os resultados considerados relevantes.

Dada a metodologia de aquisição dos dados de radiação  $\gamma$  total em Tondela (capítulo 4.1.1), é possível que um mesmo local possua dois valores. Um referente à anomalia e outro referente ao fundo envolvente. É importante definir quais os valores que devem ser considerados para a interpolação. Face à metodologia de aquisição dos dados, o valor anómalo será sempre o que se encontra espacialmente correto e que, por isso, caracteriza melhor o local exato do ponto. Já o outro valor, menor, diz respeito ao fundo radiológico ao longo de um perfil e que é projetado no seu ponto médio. Incluir apenas os valores mínimos não será o indicado, uma vez que irá retirar os dados anómalos. Isso faz com que se deixem de identificar as zonas anómalas, de grande importância para este estudo. Incluir apenas os valores máximos ou incluir todos os valores são as opções mais válidas. A primeira opção faz com que se perca informação em certos pontos, mas a segunda causa entropia e faz com que as tendências de pormenor sejam mascaradas. Todas as opções foram exploradas (incluindo a utilização dos valores mínimos). Para a análise de tendência regional foram utilizados todos os valores.

Outro aspeto de grande importância, com impacto direto na leitura que o visualizador menos sensibilizado faz dos mapas, é a definição da escala de representação. Embora muitas vezes este tópico seja descurado, é particularmente importante nesta área, que envolve conceitos de risco para a população e coloca em contacto investigadores com decisores políticos. Por exemplo, num mapa de risco, cores mais frias como azul ou verde levam o visualizador a perceber um cenário de menor risco. Já cores mais quentes, como vermelho ou castanho provocam uma perceção de maior risco. Contudo, essa decisão é arbitrária e com o mesmo conjunto de dados é possível definir classes de representação, de modo a que o mapa fique mais preenchido com a cor que pretendamos. Entre a utilização de intervalos geométricos ou intervalos de quantis, embora os intervalos geométricos ofereçam um bom resultado e não realcem áreas tão extensas com tons elevados, na escala de cores (vermelho por exemplo), os intervalos por quantis são mais fáceis de interpretar mentalmente, uma vez que o conceito de quantil se encontra no nosso dia-a-dia. Por oposição, o conceito geométrico é matemático e por isso mais complicado de interpretar de forma imediata. Por este motivo,



optou-se por utilizar a representação gráfica em função de intervalos de classes, definidos por quantis. Para cada área de estudo foi utilizada uma classificação com base nos dados de apenas essa área. Já na comparação das duas áreas, efetuou-se a junção dos dados e foram calculados os quantis do conjunto completo de dados. Só assim, sob a mesma escala, é que é possível a comparação visual das áreas.

Entre outros motivos, a divisão de classes é um dos que mais motivou a utilização da análise da curva Característica de Operação do Recetor (ROC). Numa variável sem qualquer tipo de divisão natural, relacionada com o fenómeno em estudo, pretendeu-se definir uma classificação com significado estatístico, em relação com a classificação atribuída à variável de interesse.

### *4.2.3 Análise da curva Característica de Operação do Recetor (ROC)*

O mapa resultante da análise geoespacial dos dados de radiação  $\gamma$  total, por si só, não possui relação com a variável de risco em estudo: as concentrações do gás radão em habitações. Este está mais próximo de um Mapa de Potencial Geogénico de Radão (MPGR)<sup>7</sup>, refletindo indiretamente a disponibilidade, *in-situ*, do gás radão, através da radiação  $\gamma$ , cuja variabilidade demonstrou-se ser relacionada com a variabilidade na cadeia de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . No entanto, para uma avaliação precisa do potencial de radão geogénico falta ainda considerar a variável da permeabilidade. Em Salgado (2000) essa variável foi obtida de forma qualitativa, pela análise de amostras análogas que existiam disponíveis. A limitação desta metodologia prende-se com o facto de as classes utilizadas serem generalistas. Na prática, todas as unidades litológicas obtiveram a mesma classificação, o que indiretamente atribui pouco peso à variável na modelação. Mais ainda, as unidades litológicas apresentam permeabilidade que varia espacialmente, em função do grau de alteração, especialmente nas rochas graníticas.

Em função do exposto anteriormente, relativamente à estimativa do potencial de radão geogénico, optou-se por uma hipótese alternativa. Dada a disponibilidade de dados recentes, sobre as concentrações de radão no interior de habitações, procurou-se aplicar uma metodologia que permitisse chegar a um mapa de áreas propensas a radão (MAPR), com base na informação, satisfatoriamente completa, de radiação  $\gamma$  total.

Também já abordado no capítulo 2, não existe uma única metodologia correta para desenvolver mapas de áreas propensas a radão. A metodologia a adotar depende em primeira instância, dos dados disponíveis. Os dados de concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  em habitações

---

<sup>7</sup> As terminologias dadas a cada tipo de mapa, função dos dados originais e dos dados de validação, bem como os seus objetivos e implicações na interpretação dos resultados foi alvo de discussão no capítulo 2.

disponíveis são limitados: (i) se o objetivo for elaborar um mapa à escala nacional, os dados disponíveis para as duas áreas urbanas (Tondela e Oliveira do Hospital) são significativamente suficientes para as caracterizar. No entanto, se o objetivo for elaborar mapas dessas áreas urbanas, como neste estudo, os dados começam a ser escassos. Isto deve-se à variabilidade, nomeadamente geológica, intrínseca à escala de trabalho; (ii) devido ao evidente condicionamento dos dados às áreas povoadas, o que implica a impossibilidade de amostrar todas as litologias ou então obter densidades muito variáveis de dados nas diversas litologias. Uma metodologia semelhante à de García-Talavera et al. (2013) é inviável pela necessidade de um grande número de pontos por área (quer seja uma base geológica ou uma grelha) para possibilitar a estimação de um conjunto de parâmetros estatísticos significativos e para aplicação de testes de significância. Refira-se que no trabalho citado, numa fase de validação da classificação proposta, são utilizados alguns parâmetros baseados em tabelas de contingência. Na metodologia de Ielsch et al. (2010), a primeira fase diz respeito (tal como nesta dissertação), à análise de dados da radiação gama total em função da litologia, ordenada num ranking de “risco”. Esse ranking pode ser também atribuído às classes definidas na apresentação dos resultados da interpolação, evidenciando a variabilidade interna das litologias. A segunda fase dessa metodologia consiste em acrescentar, a essa primeira classificação, um peso conforme existam “fatores agravantes” (por exemplo, falhas ou explorações de U nas proximidades). No entanto, os pesos a atribuir a cada um desses fatores, bem como o raio de influência de cada um, são incertos. Por último, os limites dessa variável qualitativa ordinal, podem não ter um significado concreto correspondente na variável de interesse, bem como o incremento de risco, associado às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$ , entre classes de radiação  $\gamma$  total, será distinto, devido à correlação entre as duas variáveis ser positiva e significativa, mas longe de um (devido à multiplicidade dos fatores de influência nas concentrações de radão em habitações). A metodologia de Drolet et al. (2013) é conceptualmente interessante e elegante, conseguindo diferenciar classes qualitativas ordinais. Para tal, de forma sucinta, os autores validam limites de classes da variável *proxy*, com dados, em número significativamente mais reduzido, da variável de interesse. Contudo, a utilização generalizada de testes de significância, em comparações múltiplas e de forma sequencial levanta algumas incertezas quanto ao verdadeiro significado da diferenciação de classes. A metodologia de Bossew (2014), através da análise da curva Característica de Operação do Recetor (ROC, do inglês *Receiver Operating Characteristic*), permite estabelecer um sistema de classificação binário otimizado, neste caso de uma variável *proxy* para a qual não existe um limite conhecido, que dê resposta a um dado critério da variável de interesse, utilizando significativamente menos dados dessa variável. Foi esta última metodologia que foi adaptada para obter um mapa de áreas propensas a radão, na região de estudo.

A análise da curva ROC foi desenvolvida durante a Segunda Grande Guerra Mundial, com o intuito de otimizar o reconhecimento de ameaças aéreas inimigas, através da avaliação de sinais de radar pelo operador do radar, diferenciando daquilo que seriam sinais de ruído. Após a Grande Guerra, a metodologia foi aplicada a outras áreas, com objetivo semelhante de diferenciar respostas. Por exemplo na avaliação de sintomas de pacientes, quer na medicina quer na psicologia. Mais recentemente, este tipo de análise é utilizado em técnicas de avaliação de algoritmos de Machine Learning.

Este tipo de análise tem como finalidade a otimização de um sistema de classificação binário, com base na relação entre a previsão e o resultado observado. Esta noção é importante uma vez que a análise ROC não devolve um limite otimizado de classificação binária, calibrado e de elevada exatidão em relação ao valor absoluto definido como critério para a classificação binária dos resultados observados (Fawcett, 2006). A análise permite otimizar um limite relativo, das previsões, que melhor contraste as observações positivas e as observações negativas (Fawcett, 2006). Por este motivo, mesmo que para um critério definido igual, não é possível comparar diretamente dois limites de dois sistemas de classificação distintos (Fawcett, 2006). A curva ROC não é mais do que um gráfico de dispersão, onde se projeta a taxa de verdadeiros positivos, segundo o eixo das ordenadas, e a taxa de falsos positivos, segundo o eixo das abcissas, para limites a variar de forma sequencial, de uma variável para a qual se pretende otimizar um sistema de classificação binário. A reta com declive igual a um e que passa na origem dos eixos, representa o caso extremo, em que um classificador tem igual probabilidade a uma escolha aleatória (mau classificador). No caso oposto, ou seja, de um classificador ideal, o limite otimizado situar-se-ia num ponto projetado nas coordenadas (0,1).

A metodologia seguida neste trabalho foi adaptada dos trabalhos de Bossew (2014). Existe, no entanto, uma diferença significativa relativamente a esta última. Bossew (2014) utilizou como base uma grelha regular de 10 por 10 km, para estimar parâmetros estatísticos das variáveis. Neste trabalho, a base de cartografia são os contornos da interpolação dos dados de radiação  $\gamma$  total e são contabilizados os dados individuais de radão em habitações. Enquanto na utilização de uma grelha regular as áreas são fixas, na utilização de uma superfície interpolada continua, com a metodologia aplicada, as áreas são dinâmicas, variando em conformidade com o limite das superfícies interpoladas de radiação gama. Para além disso, existem também diferenças no que respeita aos dados disponíveis bem como à escala de trabalho. Como exemplo refira-se que, para a totalidade do território alemão, apenas 126 das quadriculas (10 x 10 km) possuem mais do que 30 dados de concentração de radão em habitações. Na área em estudo (com aproximadamente 10 x 10 km) estão disponíveis 50 observações da mesma variável, o que significa que esta área possui uma mais elevada densidade de pontos de amostragem; isto apesar de, à escala nacional, o números de dados

disponíveis na Alemanha ser muito elevado (cerca de 40 000 análises de  $^{222}\text{Rn}$  em habitações). Contudo, neste último país, para cada quadricula apenas é atribuído um valor da variável proxy, ignorando, assim, toda a variabilidade interna, que, como pode ser visto neste caso de estudo, é significativa.

Bossew (2014) utilizou um programa simples, desenvolvido em QB64 pelo próprio, para implementar e testar a metodologia proposta. Como esse programa não se encontra disponível, nesta dissertação a metodologia teve então de ser implementada de raiz com recurso a algumas ferramentas do ArcGIS e linguagem R.

Sem entrar em grande detalhe relativamente à parte técnica da implementação, a metodologia seguiu as seguintes etapas:

1. Foi definido como critério base um valor para a variável concentração de radão nas habitações, que estabeleça o limite entre uma área “propensa a radão” (APR), acima do valor definido, ou como “não propensa a radão” (ANPR), na situação contrária. A grande vantagem desta metodologia é a possibilidade de estabelecer um limite com base num critério conhecido e de fácil apreensão. Um bom exemplo será o nível de referência nacional em Portugal de  $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pelo facto de os dados serem considerados pontualmente, não é possível aplicar o critério  $E[\text{Prob}(C_{\text{Rn nas habitações}} \geq 300)] > 10\%$  ou  $E[C_{\text{Rn nas habitações}} \geq 300]$ . Foi então utilizado o critério  $C_{\text{Rn na habitação}} \geq 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ .
2. Para cada ponto, em função da concentração do radão no ar e do limite definido, é registado, em formato binário, se o critério é satisfeito (1, para  $C_{\text{Rn na habitação}} \geq 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ou não (0, para  $C_{\text{Rn na habitação}} < 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ).
3. De forma sucessiva e incremental, estabelecem-se diferentes patamares definidos por valores limite, identificados pela sigla  $l^*$ , para a variável considerada como *proxy* em avaliação de propensão ao radão, no caso a radiação  $\gamma$  total; estabelece-se um cenário como anteriormente, atribuindo-se a cada ponto um código binário, 0 (inferior ao limite) ou 1 (superior ao limite).
4. Para cada valor  $l^*$ , são comparadas, ponto a ponto, as duas classificações binárias. Numa tabela de contingência (tabela 9) é registado o somatório de casos para cada uma das quatro respostas possíveis, do sistema de classificação binário: verdadeiro positivo (VP); falso positivo (FP); verdadeiro negativo (VN); falso negativo (FN);

Tabela 9 - Tabela de contingência para registo dos cenários possíveis de um sistema de classificação binário, em função do critério definido; a notação "1" indica uma APR e a notação "0" indica uma não-APR, quer para a previsão, quer para a observação;  $l^*$  é o limite de classificação definido;

		Classificação de $^{222}\text{Rn}$ nas habitações (Observado)	
		$C_{Rn} \geq 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 1	$C_{Rn} < 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 0
Classificação baseada na radiação $\gamma$ total (Previsto)	$\gamma \geq l^*$ 1	Verdadeiro Positivo VP	Falso Positivo FP
	$\gamma < l^*$ 0	Falso Negativo FN	Verdadeiro Negativo VN

A partir das tabelas de contingência criadas para cada valor limite,  $l^*$ , podem ser calculados variados parâmetros estatísticos, nomeadamente as taxas de verdadeiros positivos (TVP) e de falsos positivos (TFP), projetadas no gráfico que dá origem à curva ROC. As fórmulas seguintes mostram os cálculos desses e outros parâmetros (Tharwat, 2020):

$$TVP \text{ (sensibilidade)} = \frac{\sum VP}{\sum \text{Positivos Observados}} = \frac{\sum VP}{\sum VP + FN} \quad (15)$$

$$TFP \text{ (1 - especificidade)} = \frac{\sum FP}{\sum \text{Negativos Observados}} = \frac{\sum FP}{\sum FP + VN} \quad (16)$$

$$ACC \text{ (Exatidão)} = \frac{\sum VP + VN}{\sum VP + FP + VN + FN} \quad (17)$$

$$VPP \text{ (valor preditivo positivo)} = \frac{\sum VP}{\sum \text{Positivos Previstos}} = \frac{\sum VP}{\sum VP + FP} \quad (18)$$

$$VPN \text{ (valor preditivo negativo)} = \frac{\sum VN}{\sum \text{Negativos Previstos}} = \frac{\sum VN}{\sum VN + FN} \quad (19)$$

$$+RV \text{ (rácio de verossemelhança positiva)} = \frac{TVP}{TFP} \quad (20)$$

$$-RV \text{ (rácio de verossemelhança negativa)} = \frac{(1 - TVP)}{(1 - TFP)} \quad (21)$$

$$TFO \text{ (taxa de falsa omissão)} = \frac{\sum VP}{\sum FN + VN} = 1 - VPN \quad (22)$$

$$Y \text{ (Y de Youden)} = \text{sensibilidade} + \text{especificidade} - 1 = TVP - TFP \quad (23)$$

$$MCC \text{ (coeficiente de correlação de Matthews)} \text{ (Matthews, 1975)} = \sqrt{VPP \times TVP \times (1 - TFP) \times VPN} - \sqrt{(1 - VPP) \times (1 - TVP) \times TFP \times (1 - VPN)} \quad (24)$$

$$\text{Prevalência} = \frac{\sum \text{Positivos Observados}}{\sum \text{Positivos Observados} + \sum \text{Negativos Observados}} \quad (25)$$

Existem muitos outros parâmetros para serem calculados, inclusivamente testados neste trabalho, mas que não ofereciam tanta informação aos aqui apresentados (Bossew, 2014; Tharwat, 2020). Alguns dos supracitados, quando o cálculo efetuado depende da relação entre valores das duas colunas da tabela de contingência (tabela 9), os parâmetros são sensíveis à prevalência da amostra. Por este motivo, o seu uso é muitas vezes desencorajado, como a exatidão (ACC) ou os valores preditivos (VPP e VPN). Existem algumas exceções, em que a forma de cálculo anula a prevalência, como é o caso por exemplo do Y de Youden ou os rácios de verossemelhança (+RV e -RV). Por este motivo, quando a prevalência é diferente de 0,5, os rácios de verossemelhança são uma medida mais robusta do que os valores preditivos, para avaliação do sistema de classificação. Para avaliar o sistema de classificação foram utilizados os parâmetros Y de Youden e o coeficiente de correlação de Mathews (MCC). O primeiro porque é simples de calcular e interpretar (representa a distância da reta de classificação aleatória até ao ponto projetado, num gráfico TVP vs TFP), é robusto, pois utiliza as duas colunas da tabela de contingência, e não é sensível à prevalência. O MCC é considerado o parâmetro único mais robusto de avaliação de um classificador, pois considera todos os cenários de uma tabela de contingência. A escolha do melhor limite de classificação é dependente do parâmetro utilizado para classificação (Bossew, 2014). Por este motivo, nesta dissertação não foi escolhido um parâmetro para basear a classificação. Foi efetuada uma análise comparativa dos vários parâmetros e em função da informação que eles devolvem, foi definido de forma ponderada o melhor limite de classificação.

Dado que, numa fase inicial, não se sabia se a metodologia devolveria resultados satisfatórios, a implementação foi feita por aproximações sucessivas: 1) o processamento incidiu sobre intervalos de limites de radiação  $\gamma$  total bastante largos e utilizando as ferramentas com a opção “*batch*” (ainda assim, uma operação muito manual); 2) os intervalos dos limites foram encurtados e utilizado um algoritmo elaborado em código *python* para arrancar com cada ferramenta em *loop*, para cada conjunto de parâmetros, definidos ainda de forma moderadamente manual; 3) apenas no caso de estudo de Oliveira do Hospital (capítulo 5.7.2), os parâmetros para cada processamento em *loop*, foram definidos de forma mais automatizada, permitindo um total de 731 processamentos aplicados em pouco mais tempo do que uma hora (ainda que posteriormente se tenha verificado que boa parte dos limites definidos nesta fase não fossem utilizados, ou por serem já demasiado elevados ou demasiado baixos).

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 Radiação gama total

#### 5.1.1 Tondela

Do gráfico Q-Q e histograma (figura 12), a distribuição do conjunto da informação obtida na região em estudo pode ser considerada aproximada a uma distribuição log-normal Assim, e assumindo a log-normalidade, deve ser considerada a média geométrica, em vez da média aritmética, e podem ser realizados testes de significância paramétricos, com os dados transformados no seu logaritmo (distribuição normal). Contudo, esta é apenas uma aproximação e os resultados evidenciam uma distribuição mais complexa do que a log-normal, pelo que a mediana e os quantis são os parâmetros, neste último caso, mais adequados para a estimativa da tendência central e da dispersão, respetivamente; de igual modo os testes de significância não-paramétricos serão também mais adequados à situação presente. A distribuição apresenta assimetria positiva e aparente multimodalidade (mais evidente no gráfico Q-Q da figura 12). Esta assimetria pode se dever aparentemente à ocorrência de valores anómalos<sup>8</sup>, ou à existência de diferentes populações, que fazem com que a cauda direita se estenda.

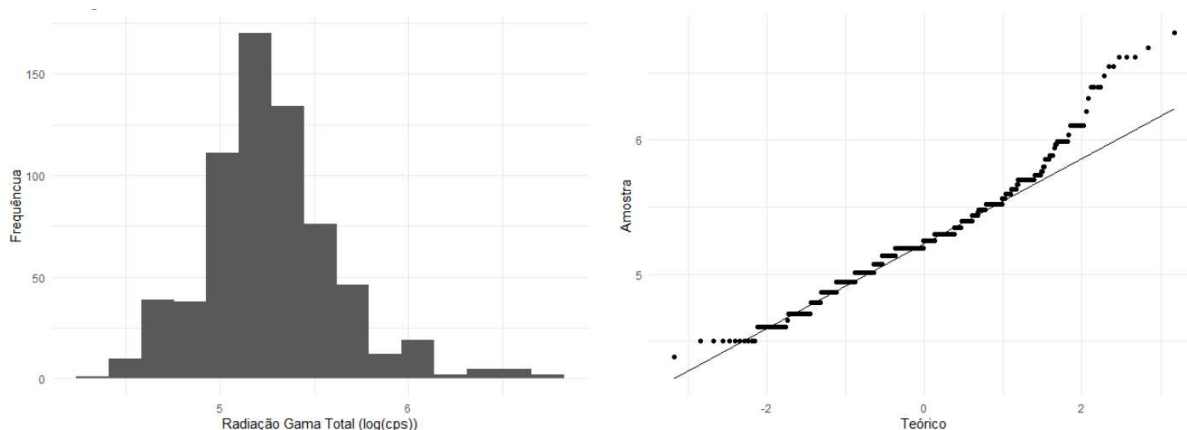


Figura 12 - Histograma (esquerda) e gráfico quantil-quantil (direita), da transformação logarítmica dos dados de radiação gama, para a região de Tondela

<sup>8</sup> O termo estatístico correto é, do inglês, “outlier”. No entanto, neste contexto geoestatístico deve ser tratado como “anomalia”.

Para se poder encontrar a razão ou razões para a forma da distribuição encontrada deverão ser avaliadas as distribuições individuais obtidas nas diferentes litologias reconhecidas na região em estudo (rochas graníticas de natureza diversa (GT, GTB, GV e FG), metassedimentos (CXG) e materiais sedimentares mais recentes (DEP)). Os resultados expõem-se nas figuras 13 e 14, sendo a primeira composta pelos histogramas e pelos digramas Q-Q, e a segunda pelos diagramas de caixas correspondentes a cada litologia.

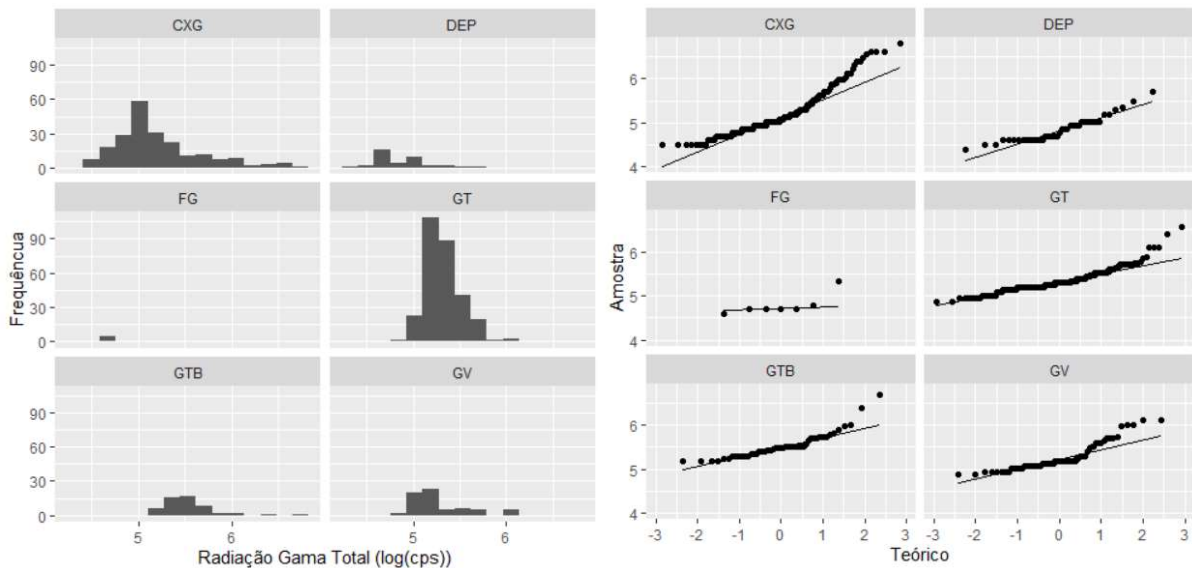


Figura 13 - Histogramas (esquerda) dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em log(cps)), em função da geologia, para a região de Tondela.



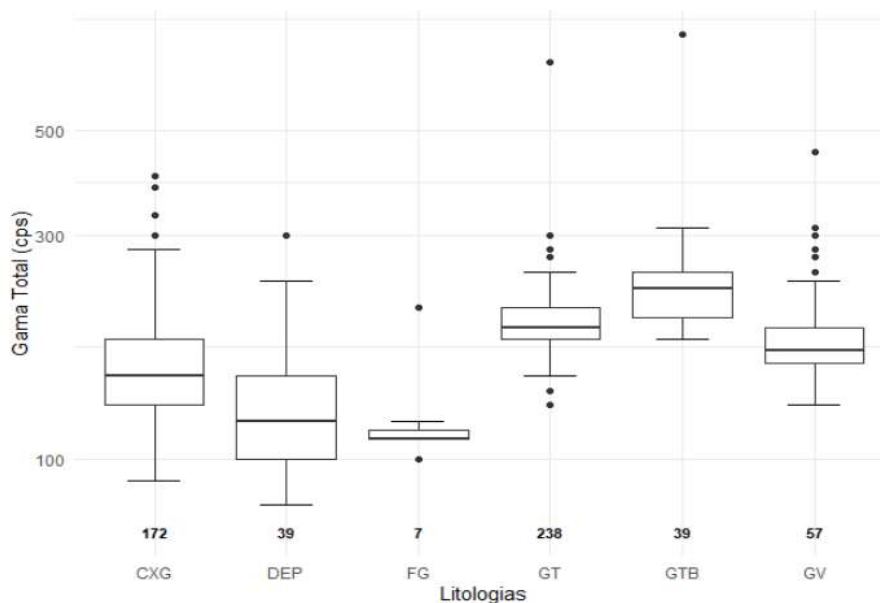


Figura 14 - Diagrama de caixas dos dados de radiação gama total, para a região de Tondela.

Os histogramas e os diagramas das diferentes unidades geológicas mostram um padrão, em geral, próximo ao obtido para o conjunto da população de dados, o que indica ser a geologia um fator condicionante. Litologias geoquimicamente diferenciadas, é expectável que apresentem distribuições de teores de U, Th e K diferenciadas e desse modo contribuam para a variabilidade nos valores da radiação  $\gamma$  total.

Os granitoides geram fluxos de radiação gama mais elevados evidenciados pelos valores mais elevados de choques por segundo. Tal reflete a sua natureza geoquímica, com maiores teores de elementos radioativos face às demais unidades. O granito de Tábua apresenta os valores mais elevados, com uma mediana de 240 cps, seguido do granito de Tondela com 200 cps e do granito da Várzea, com 180 cps. O intervalo interquartil destas unidades, que varia de 50 a 70 cps, indica que a dispersão é dos dados nestas unidades é semelhante.

Os metassedimentos, embora apresentem valores mais baixos de choques por segundo (mediana de 160 cps), também apresentam maior variabilidade ( $IQR = 92$  cps). Os valores tipicamente mais baixos refletem a sua natureza geoquímica, compostos por xistos e grauvaques com teores mais baixos nos elementos radioativos. Já a maior variabilidade do fundo radiométrico é o reflexo também dos processos sin e pós-implantação dos corpos graníticos. Na prática, embora menos frequentes, podem ser observados valores da mesma ordem de grandeza dos valores observados nos granitoides (figura 14). Uma sugestão de Salgado (2000) para esta variabilidade é a existência de dois grupos no CXG: um grupo afetado por processos de metassomatismo de contacto, onde são incluídos os encraves no interior do GT e uma auréola junto do contacto com o mesmo; outro grupo não afetado por

estes processos e exterior ao GT. Na figura 13, a análise do histograma não clarifica a dúvida quanto à existência de duas subpopulações. Deteta-se de facto uma assimetria positiva, a ocorrência de algumas classes de valores mais elevados mas de baixa frequência, mas estas observações, por si só, não são suficientes para afirmar com segurança que estamos em presença de diferentes populações. Acresce a presença de anomalias radiométricas pontuais que foram associadas a falhas geológicas (Salgado, 2000) que, naturalmente, integram as classes de valores mais elevados. No sentido de testar quantitativamente a hipótese de que o grupo de metassedimentos inclusos no GT (CXGI) e o grupo de metassedimentos exterior ao GT (CXGE) provêm de uma mesma distribuição, foram efetuados o teste de Mann-Whitney ( $p < 0,001$ ) e o teste de Kolmogorov-Smirnov ( $p < 0,001$ ). Ambos indicaram que devia ser aceite a hipótese alternativa e, assim, o grupo CXG deveria ser subdividido nos dois subgrupos atrás referidos. No entanto, e apesar do resultado dos testes, considerou-se que, tendo em conta também outra informação disponível, tal não deve ser feito, pelas seguintes razões: (i) a tendência central continua a ser muito próxima ( $med_{CXGI} = 150 \text{ cps}$  e  $med_{CXGE} = 140 \text{ cps}$ ), bem como o intervalo interquartil ( $IQR_{CXGI} = 50 \text{ cps}$  e  $IQR_{CXGE} = 50 \text{ cps}$ ); (ii) a simples visualização da distribuição espacial dos dados mostra que existem metassedimentos como encaves no interior do GT com valores de radiação muito variados, por vezes muito elevados, mas também com alguma frequência valores muito baixos; atendendo ao enquadramento, em ambos os casos afetados por metamorfismo térmico e metassomático, seria expectável que os metassedimentos, neste último contexto, apresentassem valores mais elevados e coerentes entre si. No entanto, isto não é verificado, e, tendo em conta também as observações de campo, existirá outro fator condicionante, para além do litológico e do metamórfico, que será o contexto estrutural e em especial as falhas, tal como observado noutros trabalhos em áreas de contexto geológico similar (Pereira et al., 2010; Pereira & Neves, 2012).

Os depósitos sedimentares apresentam os valores mais baixos de radiação gama total, com mediana de 120 cps, bem como uma dispersão reduzida, indicada por um  $IQR = 50 \text{ cps}$ . A exceção é um local que pelo valor obtido da radiação gama (300 cps), tendo em conta a variabilidade dentro desta unidade, poderia ser considerado “*outlier*” pelo método dos quartis ( $> 3^{\text{o}} \text{ Quartil} + 1,5 \times IQR$ ). Os depósitos sedimentares de cobertura diferenciam-se claramente em duas subpopulações (gráfico Q-Q da figura 13). Estas estão relacionadas com a intercalação de níveis argilosos que apresentam valores mais elevados de radiação gama (Salgado, 2000). No entanto, esta divisão não deve ser considerada nesta tese, uma vez que a variabilidade ocorre a uma escala incompatível com a escala de trabalho, na vertical (dimensão “z”), sendo a sua representação complicada num mapa a duas dimensões, “x” e “y” (com recurso a isolinhas).

O filão granítico cartografado apresenta valores muito baixos de radiação  $\gamma$  total ( $med = 110$  cps). Este é um corpo granítico tardio, de natureza filoniana, distinto das três outras unidades graníticas, e que apresenta valores de choques por segundo inferiores, que se justificam pela composição mineralógica do corpo, composto quase exclusivamente por quartzo, feldspato e moscovite sendo a biotite muito rara.

O teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis foi efetuado no sentido de dar maior robustez à interpretação semi-quantitativa descrita, bem como dar maior robustez à hipótese de que a radiação gama total é controlada pelas unidades geológicas. Sob a hipótese nula,  $H_0$ , assume-se que as várias distribuições provêm de uma mesma distribuição. A hipótese alternativa,  $H_a$ , assume que pelo menos uma das distribuições não provem da mesma distribuição que as restantes. O resultado do teste é apresentado na tabela 10. Assumindo a hipótese nula,  $H_0$ , a probabilidade de ocorrer um resultado como o observado,  $valor\ p < 2,2 \times 10^{-1}$ , é inferior ao nível de significância  $\alpha = 0,05$ , pelo que  $H_0$  deve ser rejeitada e assumida a hipótese alternativa,  $H_a$ .

Tabela 10 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de radiação gama total (em cps), em função da litologia, e parâmetros calculados do teste de Kruskal-Wallis, para a região de Tondela. Abreviações: Lito – Litologia; n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo; GL – graus de liberdade;

Radiação gama total – Tondela									
Lito	n	GM	DPG	Mín	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max	Teste de Kruskal- Wallis
CXG	216	181,6	1,60	90,0	130,0	160,0	222,0	900,0	$p < 0,001$ $X^2 = 171,7$ $GL = 5$
DEP	39	127,2	1,34	80,0	100,0	120,0	150,0	300,0	
FG	7	120,5	1,28	100,0	110,0	110,0	115,0	210,0	
GT	289	206,2	1,25	130,0	180,0	200,0	230,0	700,0	
GTB	53	252,1	1,33	180,0	210,0	240,0	280,0	800,0	
GV	66	194,2	1,36	130,0	160,0	180,0	215,0	450,0	

No entanto, o teste de Kruskal-Wallis não nos indica qual o grupo (ou grupos) que se diferenciam. Para isso foi utilizado o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney por pares. Os resultados encontram-se na matriz da tabela 11. Foi utilizado o método de correção de Holm (1979) dos valores-p para comparações múltiplas. Este tipo de métodos é especialmente importante, uma vez que o objetivo principal é afirmar que devemos considerar a geologia como fator condicionante da radiação gama total. Tal como seria expectável, é possível afirmar que a geologia controla o campo total de radiação  $\gamma$ . O filão granítico é a única unidade que não apresenta uma diferença significativa para com outra unidade. Mais especificamente para com os depósitos sedimentares. Estas variações de significância devem-se em grande medida à reduzida amostragem da unidade ( $n = 7$ ). Por este motivo, os

seus parâmetros estatísticos devem ser considerados com prudência. Ainda assim, também esta unidade deve ser considerada separadamente, uma vez que as restantes comparações entre unidades demonstram uma dependência do campo de  $\gamma$  total, em função das unidades geológicas.

Tabela 11 - Matriz de valores-p do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney por pares, para a região de Tondela. Ajuste dos valores-p pelo método de Holm.

	CXG	DEP	FG	GT	GTB
DEP	0,001				
FG	0,026	0,86			
GT	<0,001	<0,001	<0,001		
GTB	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
GV	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

### 5.1.2 Oliveira do Hospital

Na área de estudo de Oliveira do Hospital o cenário é mais complexo, devido aos dados terem sido obtidos em situações muito distintas, quer nas escalas de trabalho como até na sua própria metodologia de aquisição. Dado que a cartografia geológica de base regional se encontra indisponível para a totalidade da área, cada conjunto de dados foi, em primeiro lugar, analisado em função da interseção espacial com a cartografia disponível para a correspondente escala em que foram adquiridos.

As anomalias identificadas à escala regional, em função do granito de Tábua e do granito de Oliveira do Hospital, seguem uma distribuição aproximadamente log-normal, com assimetria positiva (figura 15). Os dados apresentam dispersões idênticas, ligeiramente maior no GOH ( $IQR_{GOH} = 400 \text{ cps}$ ;  $IQR_{GTB} = 250 \text{ cps}$ ), e as medidas de tendência central são também idênticas, ligeiramente inferiores no GOH ( $med_{GOH} = 400 \text{ cps}$ ;  $med_{GTB} = 450 \text{ cps}$ ). A transição de uma litologia para a outra está relacionada essencialmente com o tamanho do grão e por isso é expectável que constituam uma distribuição de dados única. Com recurso ao teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, sob a hipótese nula,  $H_0$ , as duas distribuições provêm de uma mesma distribuição. Para um grau de significância de 5%, um valor-p = 0,288 indica que deve ser aceite  $H_0$ . O teste de Kolmogorov-Smirnov ( $p = 0,109$ ), embora limitado (ver capítulo 4.2.1), indica que a dispersão também deve ser considerada como idêntica. Os dois conjuntos de dados foram agrupados e os seus parâmetros estatísticos básicos podem ser consultados na tabela 12.

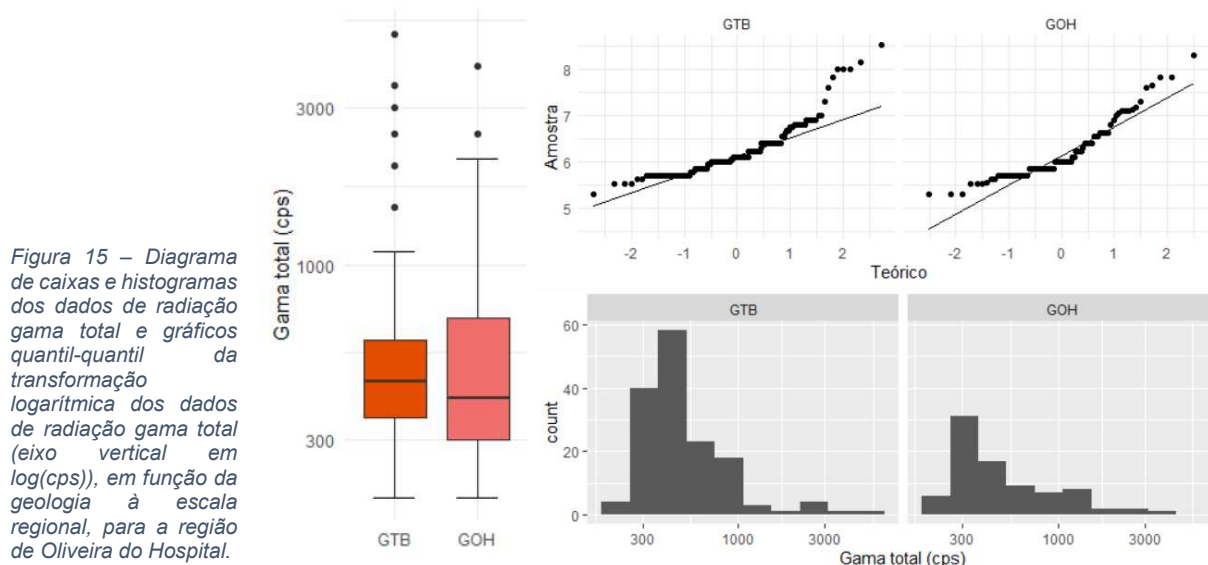


Figura 15 – Diagrama de caixas e histogramas dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em  $\log(\text{cps})$ ), em função da geologia à escala regional, para a região de Oliveira do Hospital.

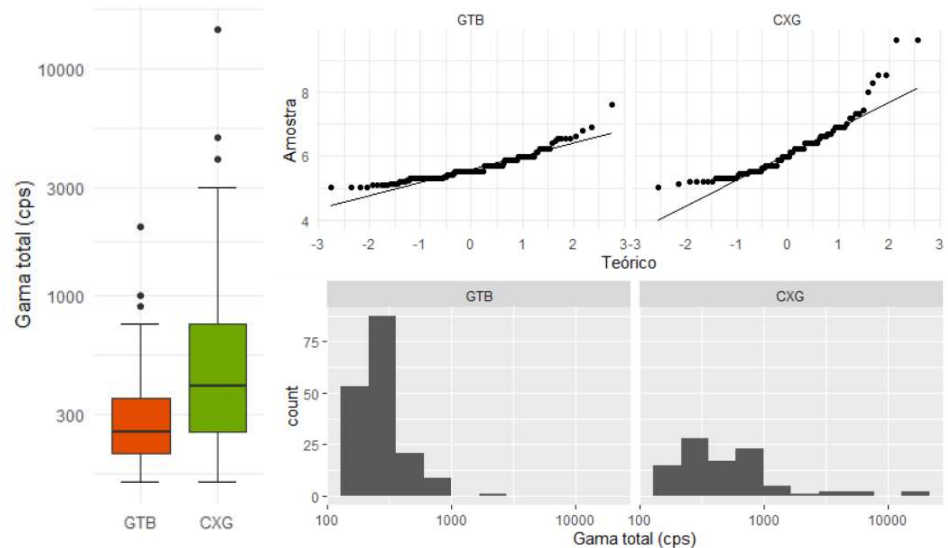
Tabela 12 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de radiação gama total (em cps), em função de várias litologias e escala, e parâmetros calculados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney e teste de Kolmogorov-Smirnov, para a região de Oliveira do Hospital. Abreviações: n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo; W-M-W – Wilcoxon-Mann-Whitney; K-S – Kolmogorov-Smirnov;

Radiação gama total – Oliveira do Hospital										
	n	MG	DPG	Min	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max	Teste de W-M-W	Teste de K-S
<b>Escala regional</b>										
GTB	153	503,5	1,73	200	350	450	600	5000	p = 0,288	p = 0,109
GOH	83	496,2	1,89	200	300	400	700	4000		
<b>Escala de pormenor</b>										
GTB	171	274,6	1,49	150	200	250	350	2000	p < 0,001	p < 0,001
CXG	95	484,5	2,48	150	250	400	750	15000		
<b>Escala regional e de pormenor</b>										
GTB + GOH	236	500,9	1,78	200	350	420	600	5000	p = 0,080	p < 0,001
CXG	95	484,5	2,48	150	250	400	750	15000		

A uma escala de pormenor (1:2 000), em função do granito de Tábua e dos encraves metassedimentares, os dados seguem distribuições aproximadamente log-normal, com assimetria positiva (figura 16). Os encraves metassedimentares apresentam medidas de tendência central superiores ( $med = 400 \text{ cps}$ ), bem como uma maior dispersão ( $IQR = 500 \text{ cps}$ ), por comparação com o granito de Tábua ( $med = 250 \text{ cps}$ ;  $IQR = 150 \text{ cps}$ ). Este, por sua vez, em comparação com os parâmetros estatísticos da mesma litologia à escala regional

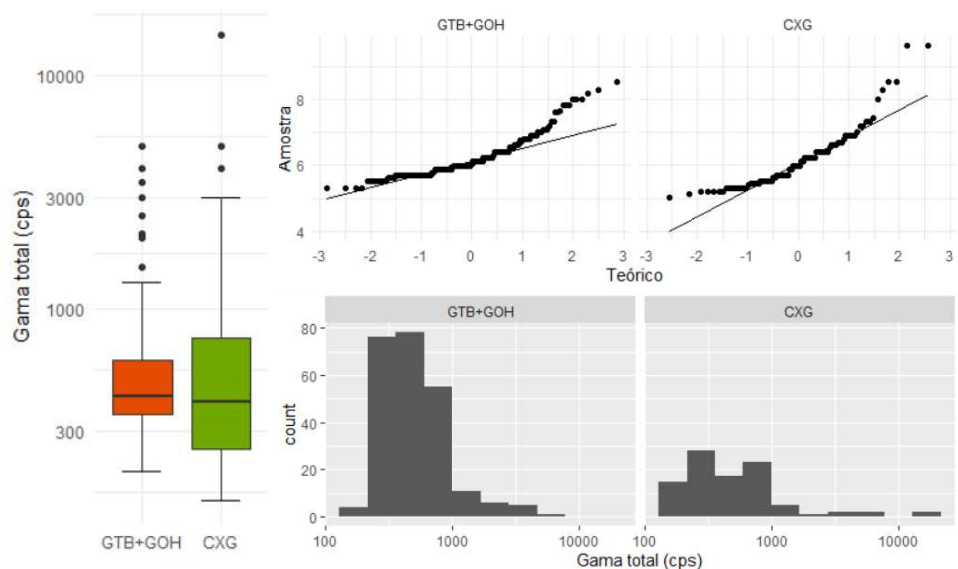
(tabela 12), apresenta uma mediana e um intervalo interquartil mais baixos. O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney indica que a hipótese alternativa deve ser aceite ( $p < 0,001$ ;  $\alpha = 0,05$ ), sugerindo que as duas distribuições provêm de diferentes distribuições.

Figura 16 – Diagrama de caixas e histogramas dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em  $\log(\text{cps})$ ), em função da geologia à escala de pormenor, para a região de Oliveira do Hospital.



Por último, foram comparados os dados das anomalias à escala regional, no GTB e no GOH, com os dados da área enriquecida, correspondente aos encraves metassedimentares, à escala de pormenor (figura 17). As medidas de tendência central são idênticas e a dispersão geométrica e assimetria positiva são maiores nos encraves metassedimentares (tabela 12). O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (valor- $p = 0,080$ ) indica que deve ser aceite a hipótese nula,  $H_0$ , de que as duas distribuições provêm de uma mesma distribuição.

Figura 17 – Diagrama de caixas e histogramas dos dados de radiação gama total e gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica dos dados de radiação gama total (eixo vertical em  $\log(\text{cps})$ ), em função da geologia à escala regional e de pormenor, para a região de Oliveira do Hospital.



As relações descritas apoiam a hipótese de independência das anomalias em relação à litologia. Contudo, nas áreas onde se encontram encraves metassedimentares, muitas vezes até associados a intensa fracturação, verifica-se um enriquecimento preferencial dos destes e não do granito. A maior dispersão nos dados dos encraves pode estar relacionada com a natureza gradual do enriquecimento, com direção do granito para o enclave, que dá origem à mineralização disseminada. A relação dos valores máximos, mais elevados nos encraves do que nos granitos, pode estar relacionada com um maior contraste geoquímico, entre a fonte de U (fluidos graníticos) e a rocha enriquecida, quando o material é um xisto ou metagrauvaque, devido à sua natureza mais argilosa, do que quando o material fraturado é o próprio granito.

## 5.2 Elementos radiogénicos

### 5.2.1 *Tondela*

Em Salgado (2000) são apresentados os parâmetros estatísticos básicos, por litologia, mas considerando dois subgrupos: o da amostragem das litologias e o da amostragem das caixas de falhas que interseccionam essas litologias.

Relativamente às litologias, os teores médios e dispersão dos mesmos apresentados estão em acordo com os obtidos noutros trabalhos em materiais de natureza similar (Neves et al., 1996; Salgado et al., 1998; Pereira et al., 2002; Lamas et al., 2015; 2017). Já no material das caixas de falha, foram obtidos valores significativamente superiores.

Dados os objetivos claramente distintos entre os trabalhos de Salgado (2000) e os desta dissertação, é relevante incluir todos os dados (de fundo regional e anómalos) numa única população. Estes foram subdivididos em função da litologia. Os parâmetros estatísticos básicos das populações são apresentados na tabela 13 e na figura 18 e analisados nos parágrafos seguintes.

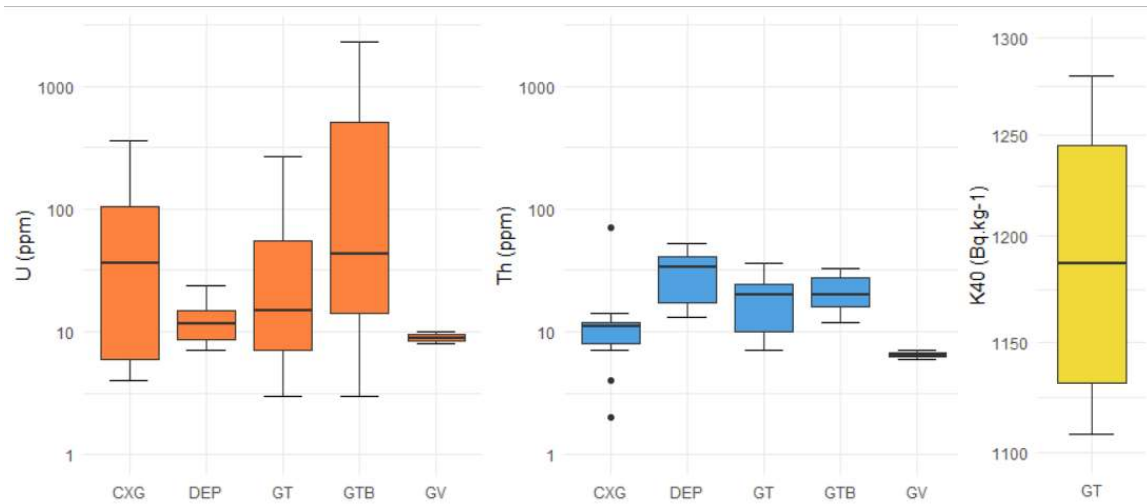


Figura 18 - Diagramas de caixas dos dados de elementos radiogénicos em amostras de rocha, em função da litologia, para a região de Tondela. A laranja dados de concentração de U, a azul dados de concentração de Th e a amarelo dados de concentração de atividade de  $^{40}\text{K}$ , por quilograma de amostra. Eixos verticais em escalas logarítmicas.

Tabela 13 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de elementos radiogénicos em amostras de rocha, em função da litologia, para a região de Tondela. Parâmetros de U e Th em ppm e parâmetros de  $^{40}\text{K}$  em ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , de amostra). Litologias com número de amostras inferior a dois foram suprimidas. Abreviações: Lito – Litologia; n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo;

Concentrações de elementos radiogénicos em amostra de rocha - Tondela									
Lito	Elemento /isótopo	n	MG	DPG	Min	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max
CXG	U	37	28,7	4,14	4	6	36	105	361
	Th		10,4	1,64	2	8	11	12	71
DEP	U	10	11,8	1,46	7	9	12	15	24
	Th		28,4	1,71	13	18	34	41	53
GT	U	19	20,1	3,66	3	7	15	55	267
	Th		15,8	1,74	7	10	20	25	36
	$^{40}\text{K}$		5	1188,4	1,06	1108	1131	1187	1245
GTB	U	10	73,6	9,95	3	14	67	563	2280
	Th		20,5	1,42	12	16	20	28	33
GV	U	2	8,9	1,17	8	9	9	10	10
	Th		6,5	1,12	6	6,3	6,5	7	7

Os dados de  $^{40}\text{K}$  são insuficientes para se obter qualquer tipo de informação da sua distribuição “intra-“ e “inter-litologias”. Já os dados de U e Th revelam teores médios, por litologia, significativamente elevados, face aos valores médios destes elementos na composição da crosta, respetivamente 2,8 ppm de U e 10,7 ppm de Th (Taylor & McClennan, 1985).

As amostras apresentam valores de tório em torno da média crustal, como é o caso do CXG, com uma média geométrica de 10,4 ppm. O GT apresenta valores superiores à média crustal (15,8 ppm), e o GTB apresenta valores ligeiramente superiores (20,5 ppm) aos do GT, duplos dos da média crustal. Os depósitos sedimentares apresentam os valores



médios mais elevados de Th (28,4 ppm), com um enriquecimento aproximadamente triplo em relação à média crustal. O GV, embora com dados limitados, encontra-se empobrecido em Th (6,5 ppm), em relação à média crustal.

As concentrações de U mostram um padrão significativamente distinto. O CXG, com uma média geométrica de 28,7 ppm, apresenta um enriquecimento de cerca de dez vezes os teores médios crustais, inclusive com média geométrica superior à do GT, apenas justificável pelos processos térmicos e metassomáticos associados ao metamorfismo regional e/ou pela reprecipitação de U secundário em caixas de falha a intersetarem estas litologias. O GT apresenta um enriquecimento de cerca de sete vezes a média crustal e a sua concentração média (20,1 ppm) é significativamente superior ao fundo regional (5,5 – 10,6 ppm (Salgado, 2000; Pereira et al., 2002; Lamas et al., 2015; 2017)). O GTB é a litologia que apresenta o valor médio mais elevado de U (73,6 ppm): cerca de 26 vezes a média crustal e significativamente superior ao fundo regional (8,2 – 13,7 ppm (Salgado, 2000; Pereira et al., 2002; Lamas et al., 2015; 2017)). Os depósitos sedimentares apresentam um menor enriquecimento de U (11,8 ppm), cerca de quatro vezes a média crustal.

De todas as litologias, os depósitos sedimentares são os únicos que apresentam, em valores médios, uma relação U/Th, de 0,42, mais próxima da relação U/Th na crosta (0,26). Nas restantes litologias, em média, a relação é superior a 1, evidenciando o claro enriquecimento em U. Isto pode indicar que para os DEP, os fatores condicionantes da distribuição sejam mais perto das condições normais e não de condições anómalas, ainda assim com enriquecimento significativo, dada a proximidade às fontes litológicas em elementos radiogénicos.

As concentrações de tório apresentam um desvio padrão geométrico relativamente pequeno e constante ao longo das litologias. Em contraponto, o U apresenta um desvio padrão geométrico significativamente superior e muito variável ao longo das litologias. Embora Salgado (2000) não tenha publicado os dados de potássio, afirma que a variabilidade é reduzida.

Este estimador da variação dos elementos radiogénicos, bem como a relação U/Th, fornecem a indicação, para este contexto geológico, que a variação dos valores de campo de radiação gama total é fruto da contribuição do U e não do Th, que apresenta baixa variabilidade ao longo das litologias.

### 5.3 Concentrações de atividade de radão no solo

#### 5.3.1 Tondela

Os dados de concentrações de atividade de radão nos solos, na região de Tondela, seguem uma distribuição log-normal, sem evidências visuais da existência de subpopulações (figura 19). Ainda assim, dadas as conclusões retiradas da análise dos dados de radiação  $\gamma$  total estes dados foram subdivididos por grupos litológicos.

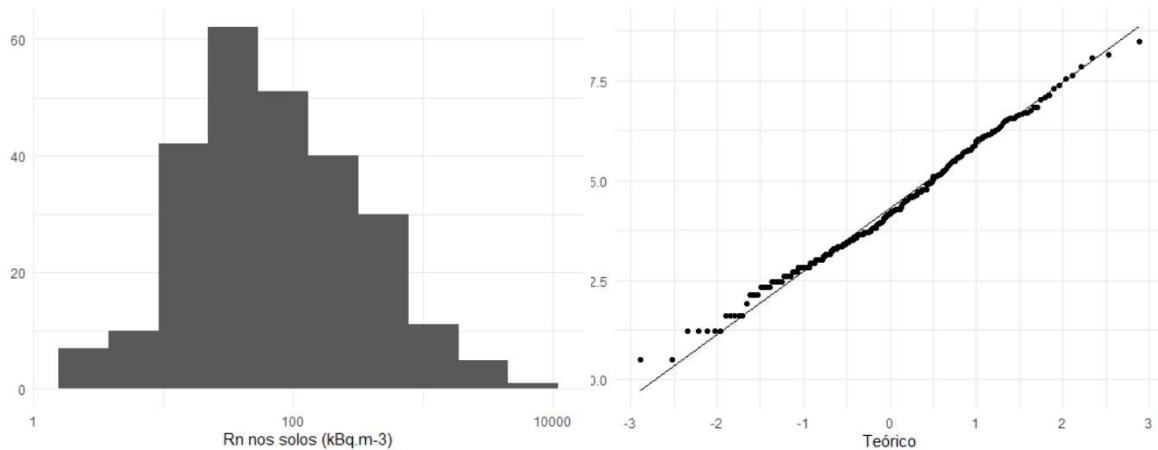


Figura 19 - Histograma (esquerda) dos dados de concentração de atividade de radão nos solos e gráfico quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica de concentração de atividade de radão nos solos (eixo vertical em  $\log(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3})$ ), para a região de Tondela.

Com exceção dos metassedimentos e do filão granítico, com maior desvio padrão geométrico (5,48 e 8,66, respetivamente), as restantes unidades apresentam uma dispersão semelhante (desvio padrão geométrico que varia de 2,23 a 2,66) (tabela 15). Os DEP apresentam uma média geométrica de  $13,1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ , mais baixa do que os granitos. As

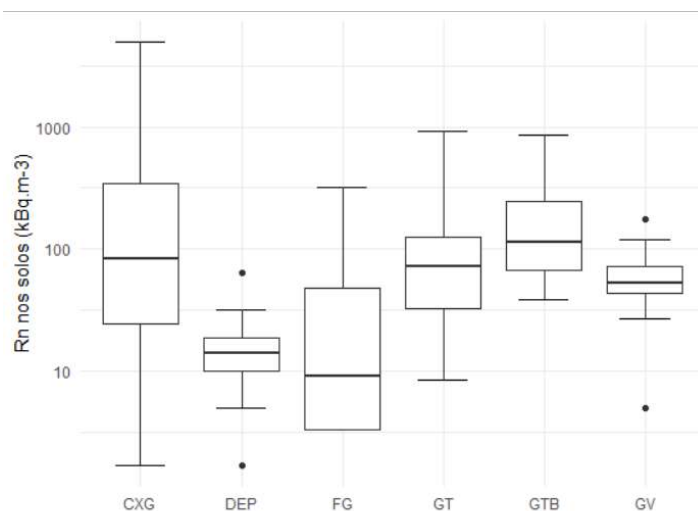


Figura 20 - Diagrama de caixas dos dados de de concentração de atividade de radão nos solos, para a região de Tondela.

distribuições destes últimos sobrepõem-se (figura 20), contudo, o GTB apresenta uma tendência central ( $143,1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) superior ao granito de Tondela ( $68,8 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) e ao granito da Várzea ( $52,1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) (figura 20 e tabela 15). O filão granítico, em comparação com as restantes unidades, carece de amostragem ( $n = 4$ ). Os metassedimentos, à semelhança do padrão identificado nos dados de radiação  $\gamma$  total, apresentam uma dispersão muito elevada, cuja distribuição se sobrepõe às restantes (figura 20).

Tabela 14 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos (em  $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ), em função da litologia, e parâmetros calculados para o teste de Kruskal-Wallis, para a região de Tondela. Abreviações: Lito – Litologia; n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo; GL – graus de liberdade;

Concentrações de atividade de radão nos solos - Tondela									
Lito	n	MG	DPG	Min	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max	Teste de Kruskal-Wallis H <sub>0</sub> : CXG = DEP = FG = GT = GTB = GV
CXG	147	89,0	5,48	1,7	24,4	82,3	347,8	4903,9	
DEP	16	13,1	2,23	1,7	10,1	14,3	18,9	63,8	
FG	4	17,3	8,66	3,4	3,4	14,3	98,3	317,5	
GT	63	68,8	2,66	8,4	32,8	72,2	126,0	920,6	
GTB	16	143,1	2,56	38,6	67,6	114,2	245,7	863,5	
GV	13	52,1	2,34	5,0	43,7	52,1	72,2	174,7	

O padrão da distribuição do grupo CXG, possível de verificar no gráfico Q-Q da figura 21 e no histograma da figura 22, sugere a presença de duas subpopulações, que se sobrepõem, à semelhança do que foi observado nos dados de radiação  $\gamma$  total. A não subdivisão destas duas subpopulações prende-se mais uma vez com o facto de, com os dados existentes, não ser possível encontrar a subdivisão ideal. Já as restantes unidades não aparentam possuir uma sobreposição de distribuições.

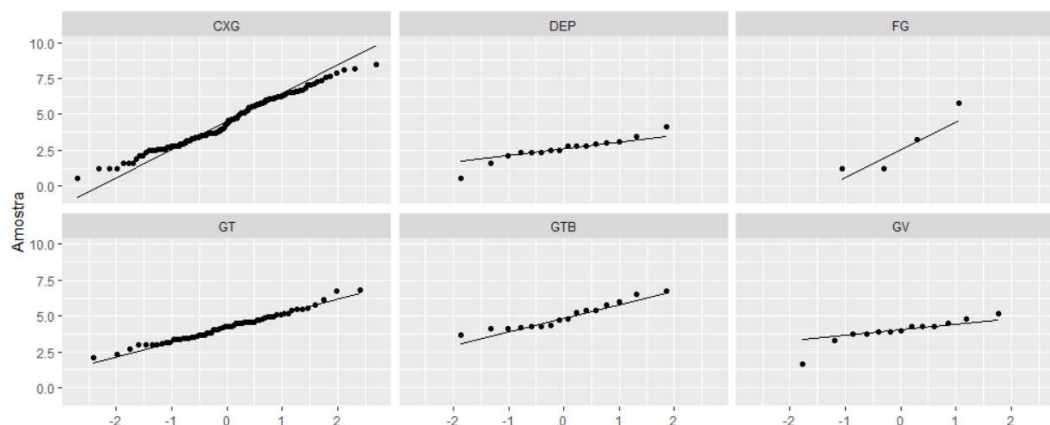


Figura 21 - Gráficos quantil-quantil da transformação logarítmica de concentração de atividade de radão nos solos (eixo vertical em  $\log(\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3})$ ), para a região de Tondela.

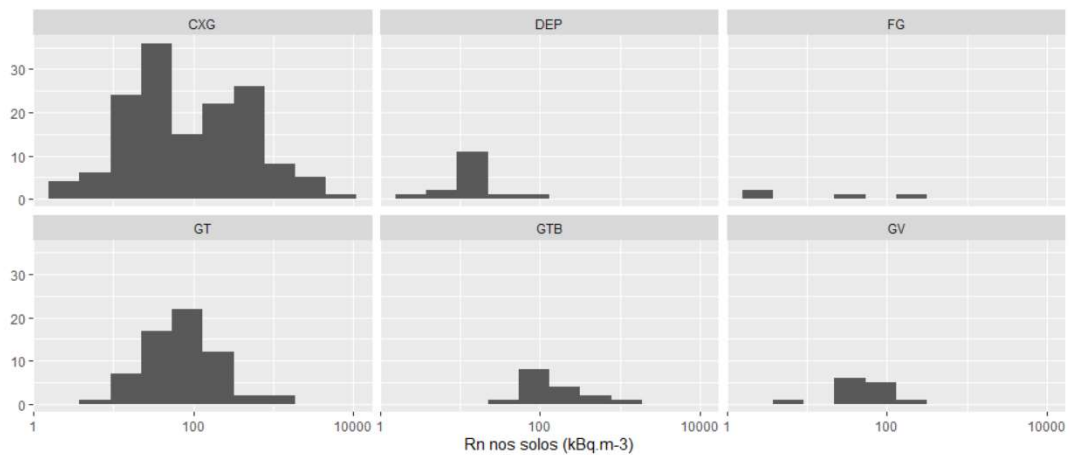


Figura 22 - Histogramas dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função da litologia, para a região de Tondela

O teste de Kruskal-Wallis, para justificar quantitativamente a divisão dos dados por unidades geológicas, devolve um valor- $p < 0,001$ , que para um grau de significância de 5% indica que deve ser aceite a hipótese alternativa, de que pelo menos uma das distribuições não pertence a uma distribuição comum. Na tabela 15 são apresentados os resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney por pares, cujos valores- $p$  não foram corrigidos para comparações múltiplas, uma vez que o objetivo do teste é apenas o de verificar diferenças entre grupos e não o de testar toda a família de distribuições. O único grupo significativamente distinto das restantes unidades geológicas são os depósitos sedimentares. O GTB é estatisticamente diferente do GT, que por sua vez é significativamente distinto do GV.

Tabela 15 - Matriz de valores- $p$  do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney por pares, para a região de Tondela. Valores- $p$  sem ajuste para comparações múltiplas.

	CXG	DEP	FG	GT	GTB
DEP	<0,001				
FG	0,095	1,000			
GT	0,412	<0,001	0,135		
GTB	0,179	<0,001	0,080	0,017	
GV	0,475	<0,001	0,192	0,503	0,012

### 5.3.2 Oliveira do Hospital

Os dados de concentração de atividade de radão nos solos, relativos a Oliveira do Hospital, foram já intensivamente analisados por Pereira et al. (2010). As anomalias

encontram-se correlacionadas com a presença de falhas, nomeadamente das famílias N35°E e N75°E. Embora em Pereira et al. (2010) os grupos tenham sido mais detalhados, para efeitos práticos, nesta dissertação foram apenas intersectados os dados com a cartografia geológica à escala 1:2 000. Os resultados devolvem um padrão, identificado visualmente nos gráficos da figura 23, semelhante aos dados de radiação  $\gamma$  total, para a escala de pormenor, com valores mais elevados nos metassedimentos do que nos granitos (tabela 16), propondo uma relação entre a variável considerada neste subcapítulo e a radiação  $\gamma$  total, também ela identificada por Pereira et al. (2010).

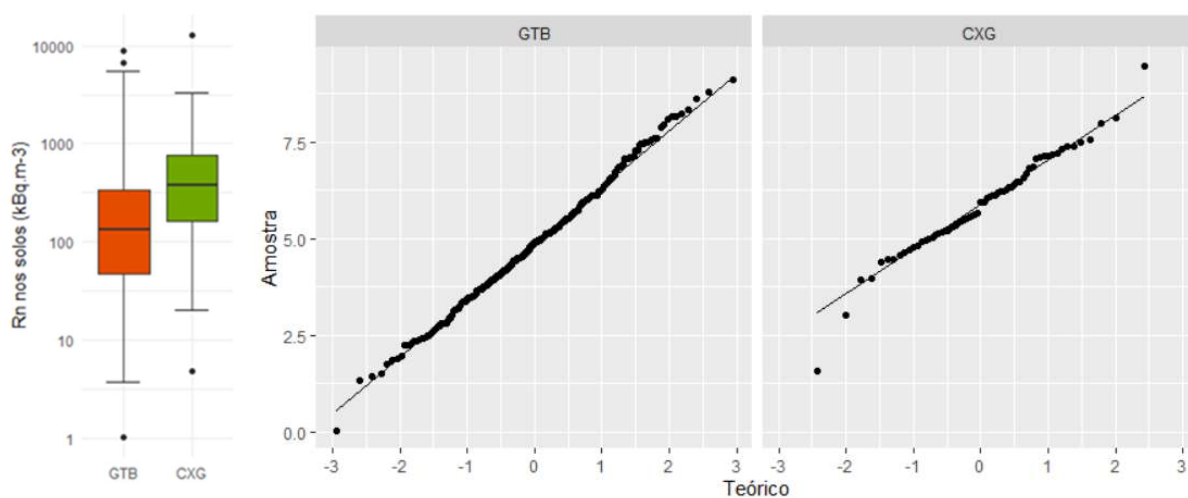


Figura 23 – Diagrama de caixas, à esquerda, dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função da litologia. Gráficos quantil-quantil, à direita, da transformação logarítmica de concentração de atividade de radão nos solos (eixo vertical em  $\log(kBq \cdot m^{-3})$ ), para a região de Oliveira do Hospital.

Tabela 16 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos (em  $kBq \cdot m^{-3}$ ), em função da litologia, e parâmetros calculados para o teste Wilcoxon-Mann-Whitney, para a região de Oliveira do Hospital. Abreviações: Lito – Litologia; n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo;

Concentrações de atividade de radão nos solos – Oliveira do Hospital									
Lito	n	GM	DPG	Min	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max	Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney
GTB	310	128,9	4,48	1,035	47,635	133,630	342,857	8894,490	p < 0,001
CXG	66	348,7	3,55	4,859	164,786	375,289	776,947	12849,900	

## 5.4 Concentrações de atividade de radão no interior de habitações

### 5.4.1 Tondela

A distribuição dos dados de concentração de atividade de radão no interior de habitações, na região de Tondela, tende a seguir uma distribuição aproximadamente log-normal (gráfico Q-Q da figura 24) e apresenta uma ligeira assimetria positiva, com dois valores visivelmente anómalos. Por seguir de perto uma distribuição log-normal teórica, a média geométrica e o desvio padrão geométrico aparentam ser parâmetros descritivos mais robustos e podem ser consultados na tabela 17.

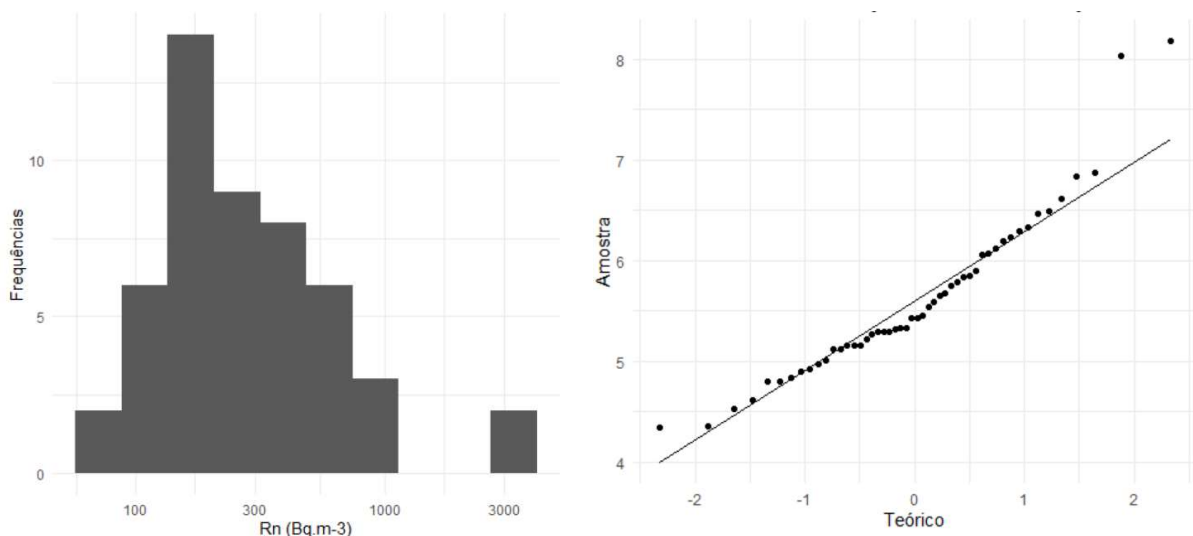


Figura 24 - Histograma (esquerda) dos dados de concentração de atividade de radão em habitações e gráfico quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica dos dados de concentração de radão em habitações (eixo vertical em  $\log(Bq \cdot m^{-3})$ ), para a região de Tondela.

Tabela 17 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão em habitações (em  $Bq \cdot m^{-3}$ ), em função da litologia, para a região de Tondela. Abreviações: Lito – Litologia; n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo; IQR – Intervalo interquartil;

Concentrações de atividade de radão em habitações (função da litologia) - Tondela							
Lito	n (% 1º Andar)	MG	DPG	Min	Max	Med	IQR
DEP	7 (0,14)	265,0	1,7	122,0	544,6	268,2	157,8
GT	31 (0,32)	281,4	2,3	77,1	3577,8	203,9	327,1
GTB	6 (0,33)	181,7	2,0	78,1	425,8	181,9	203,9
GV	6 (0,33)	389,2	2,9	133,4	3070,4	301,3	89,3

É difícil retirar conclusões apenas com base nos dados ordenados em função dos grupos litológicos, representados nos diagramas de caixas da figura 25. Apresentam medidas de tendência central e de dispersão próximas: os granitos apresentam a maior dispersão geométrica (superior a 2,00) e, com exceção do GTB ( $mg = 181,7 Bq \cdot m^{-3}$ ), uma média geométrica mais elevada ( $mg_{GT} = 281,4 Bq \cdot m^{-3}$ ;  $mg_{GV} = 389,2 Bq \cdot m^{-3}$ ). Por comparação

do GTB com os DEP ( $mg_{DEP} = 265,0 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ), a relativa baixa média geométrica do GTB poder-se-á dever à diferença na percentagem de primeiros andares, que é superior no GTB (tabela 17).

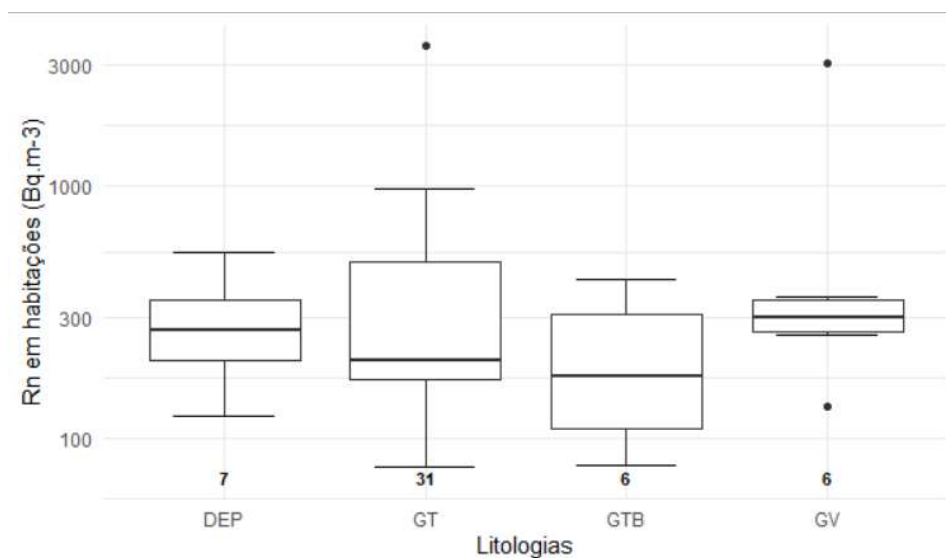


Figura 25 – Diagrama de caixas de concentrações de atividade de radão em habitações, por litologias, para a região de Tondela.

Da análise intensiva dos dados, revelou-se difícil a decisão de inclusão (ou exclusão) dos dados de primeiro andar: por princípio, para relacionar com a radiação gama total, seriam de considerar unicamente os dados referentes a rés-do-chão; contudo, as distribuições dos dados e o número reduzido destes levou a considerar a hipótese de ser benéfico incorporar ambos os conjuntos. Dada a metodologia que se pretendia aplicar (análise da curva ROC), optou-se por fazer a análise para ambos os cenários e tomar a decisão em função do melhor sistema classificador.

#### 5.4.2 Oliveira do Hospital

Nesta área de estudo, a subdivisão dos dados em função das litologias não é realizada por dois motivos: (i) os encaves metassedimentares são estruturas de dimensões muito reduzidas em relação à área de estudo, pelo que em toda a área, apenas existe um dado referente a uma habitação que se sobrepõe a esta litologia; (ii) dos dados de radiação  $\gamma$  total ficou evidente que o GTB e o GOH possuem uma natureza radiométrica significativamente igual, possuem propriedades físicas iguais e do ponto de vista petrográfico apenas demonstram uma diferença textural, relacionada com a granulometria.

A distribuição dos dados segue uma distribuição aproximadamente log-normal e os gráficos da figura 26 sugerem a existência de duas subpopulações, provavelmente com a de

maior tendência central relacionada com áreas de anomalia radiométrica, ainda que careça de confirmação. Os parâmetros estatísticos básicos calculados são apresentados na tabela 18.

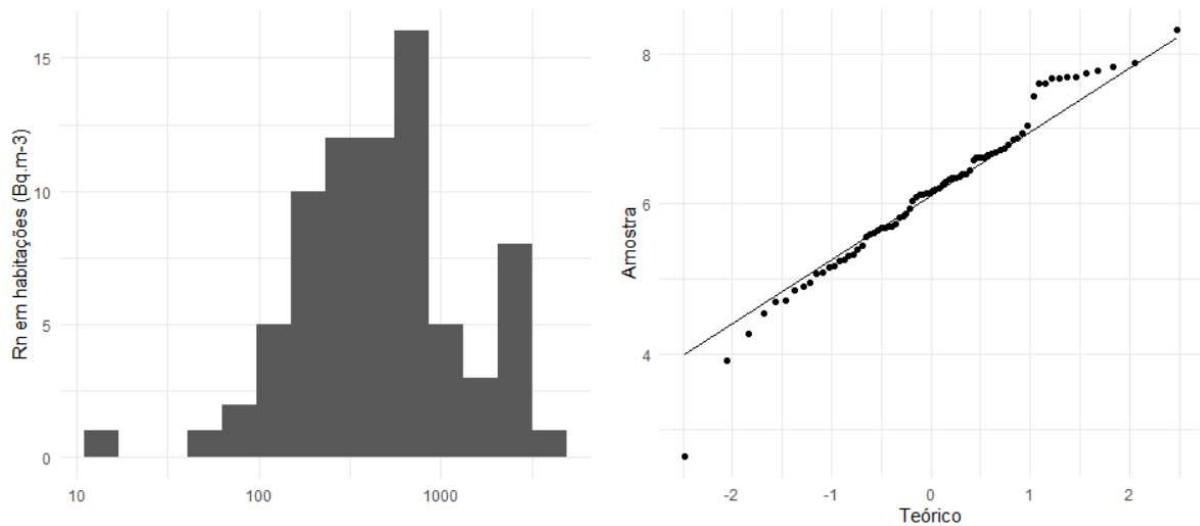


Figura 26 - Histograma (esquerda) dos dados de concentração de atividade de radão em habitações e gráfico quantil-quantil (direita) da transformação logarítmica dos dados de concentração de radão em habitações (eixo vertical em  $\log (Bq \cdot m^{-3})$ ), para a região de Oliveira do Hospital.

Tabela 18 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão em habitações (em  $Bq \cdot m^{-3}$ ), em função do andar, e parâmetros calculados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, para a região de Oliveira do Hospital. Abreviações: n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo; IQR – Intervalo interquartil;

Concentrações de radão em habitações – Oliveira do Hospital						
n (% 1º Andar)	MG	DPG	Min	Med	Max	IQR
76 (0,17)	460,4	2,8	14	475,5	4052	546,5

À semelhança do que foi abordado relativamente à região de Tondela, pela dificuldade na decisão de inclusão (ou exclusão) dos dados de primeiro andar foi efetuada a análise da curva ROC para ambos os cenários e a decisão foi tomada em função do melhor sistema classificador.

## 5.5 Simulação do fundo regional de radiação gama total para a região de Oliveira do Hospital

Tal como estabelecido em 4.2.1.1 - Simulação do fundo regional de radiação gama total para a região de Oliveira do Hospital, em primeiro lugar é necessário agrupar os dados



dos sectores de pormenor, que englobam o fundo radiológico e as anomalias. Na figura 27 verifica-se que as distribuições se intersectam significativamente. Para testar a hipótese proposta foi realizado o teste de Kruskal-Wallis, que, sob a hipótese nula,  $H_0$ , de que todas as distribuições de radiação gama total, dos sectores A, B e C, provêm de uma única distribuição comum, um valor-p = 0,202, para  $\alpha = 0,05$ , indica-nos que deve ser aceite a hipótese  $H_0$ . Os parâmetros estatísticos calculados, correspondentes ao conjunto dos sectores, encontram-se na tabela 19.

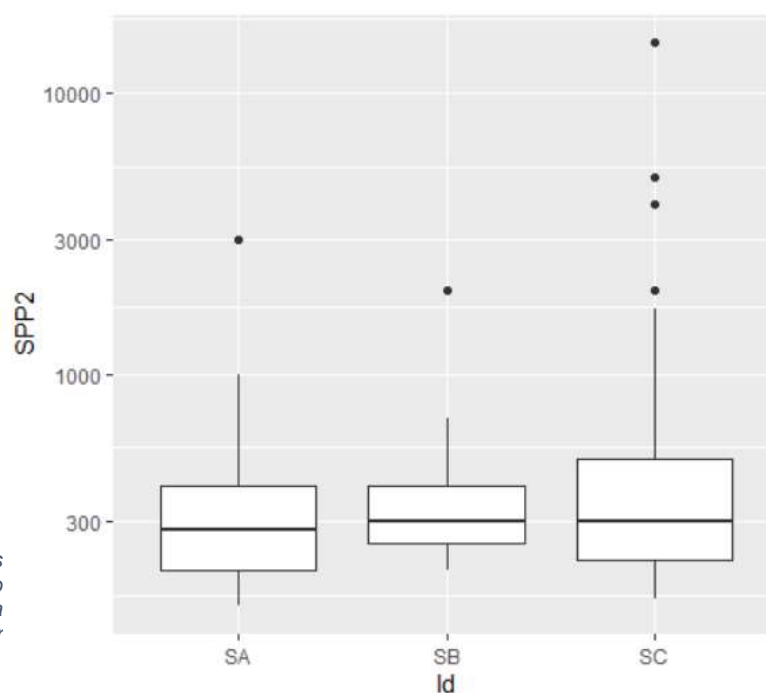


Figura 27 – Diagrama de caixas dos dados de radiação gama total, em função dos sectores estudados em pormenor, na região de Oliveira do Hospital. SA – sector A; SB – sector B; SC – sector C;

Em segundo lugar, para caracterizar o fundo radiológico, é necessário separar o fundo radiológico da anomalia, contudo este procedimento é a fase mais complicada da metodologia, uma vez que estas duas distribuições se sobrepõem. Os sectores A, B, e C, em conjunto, são o melhor caracterizador, entre os dados disponíveis, do fundo regional e das anomalias de Oliveira do Hospital. Ainda que nestes sectores se verifique a tendência para a ocorrência das anomalias nos encaves metassedimentares, existem locais dos encaves (por exemplo no sector A) onde não se verificam anomalias (padrão esse, até mais evidente, em Tondela), bem como, por oposição, nos granitos também ocorrem valores anómalos. O que justifica a utilização do conjunto de dados dos vários sectores, é mais representativa, do que a utilização de apenas uma das distribuições.

A distribuição apresenta uma assimetria muito forte, com uma cauda direita extensa (figura 28). Esta assinatura deve-se exatamente à presença de anomalias. Na figura 28 é possível verificar que a cauda direita da distribuição se começa a afastar de uma distribuição

log-normal junto do percentil 75, representado a azul. Estes dados corresponderão à subpopulação das anomalias e por isso a utilização deste percentil para a divisão das distribuições. Este, em detrimento de outros percentis superiores, permite também uma menor sobreposição das distribuições, entre o fundo regional e as anomalias. Em função desta divisão foram calculados os parâmetros estatísticos para os dados de fundo regional, apresentados na tabela 19, e foi modelada, tal como descrito no capítulo 4.2.1.1, a distribuição de onde foram retirados os dados a utilizar como fundo regional em Oliveira do Hospital, cujos parâmetros estatísticos também são apresentados na tabela 19. Foram simulados 726 valores para o fundo regional, o que corresponde a 75% dos dados totais após junção com os valores anómalos da cartografia à escala regional.

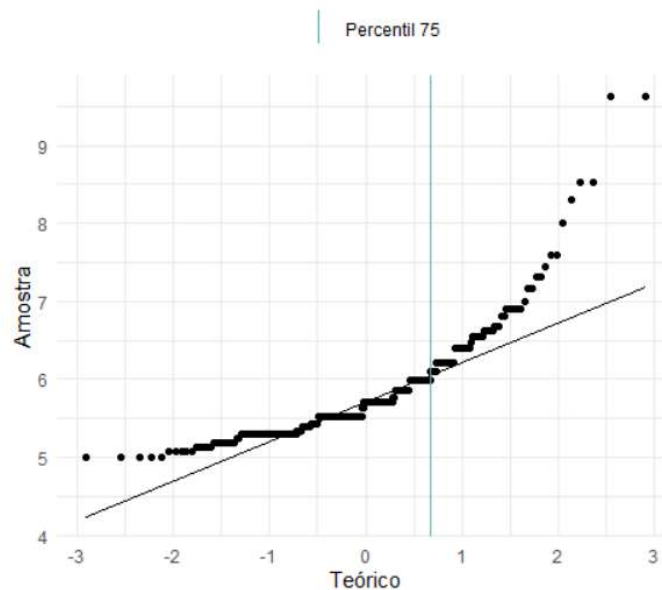


Figura 28 - Gráfico Q-Q dos dados agrupados dos sectores A, B e C. A azul encontra-se assinalado o percentil 75 (3º quartil).

Tabela 19 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de radiação gama total (em cps), necessários para a simulação do fundo regional de radiação gama total de Oliveira do Hospital, e parâmetros calculados do teste de Kruskal-Wallis. Abreviações:  $n$  – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Mlog – média dos logaritmos; DPlog – desvio padrão dos logaritmos; Min – mínimo; Med – mediana; Max – máximo; GL – graus de liberdade; sA, sB, sC – sectores A, B e C;

	n	MG	DPG	Min	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max	Teste de Kruskal-Wallis $H_0: sA = sB = sC$
$X$ {sA, sB, sC}	271	341,3	2,00	150	215	300	425	15000	$p = 0,202$ $\chi^2 = 3,203$ $GL = 2$
	n	Mlog	DPlog	Min	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max	
$X'$ (fundo regional)	203	5,52	0,26	150	200	250	300	400	
	n	MG	DPG	Min	1º Quartil	Med	3º Quartil	Max	
S (distribuição simulada)	726	254,0	1,29	110	210	260	300	520	

Outro aspeto considerado prende-se com o corte abrupto da cauda direita da distribuição assumida como fundo radiológico. Tal efeito é contornado ao simular uma distribuição para os parâmetros calculados, uma vez que a distribuição vai seguir novamente a forma de sino (figura 29), sendo a cauda direita restaurada. O máximo simulado desloca-se para a direita do máximo calculado, contudo esse deslocamento diz respeito apenas a 3% dos valores, o que não é significativo para se sobrepor às anomalias (figura 29 - função densidade à direita dos 400 cps). Mais importante, no limite máximo calculado e nos valores imediatamente à sua esquerda, o número de dados com esses valores é reduzido, retirando assim ainda alguma sobreposição remanescente da cauda esquerda da distribuição das anomalias (figura 29 - relação entre a função densidade e o histograma na classe de 400 cps).

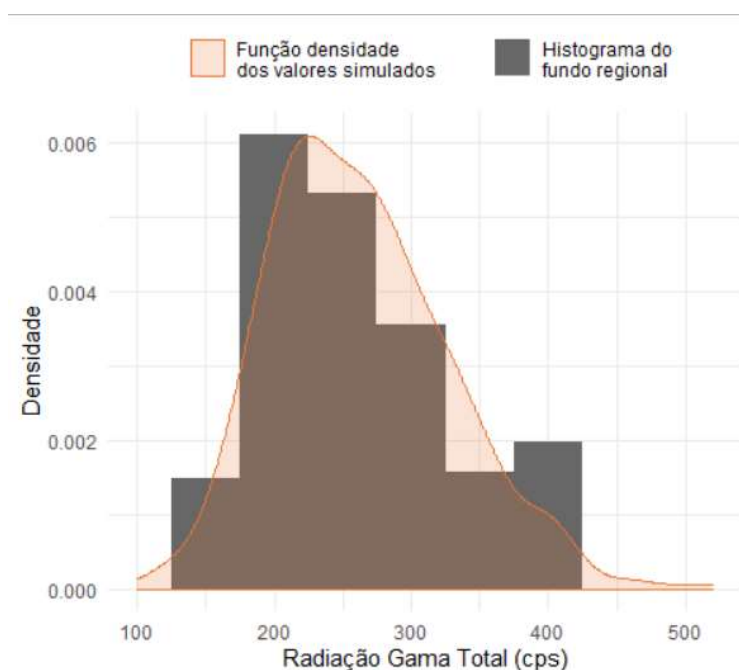


Figura 29 – Comparativo entre a distribuição simulada e a distribuição observada, do fundo regional de radiação gama total.

## 5.6 Análise geoespacial e interpolação

### 5.6.1 Radiação gama total

#### 5.6.1.1 Tondela

Exploraram-se duas situações usando em cada cenário os seguintes dados: a) os valores mínimos, o que corresponderá essencialmente ao fundo radiológico; b) os valores máximos, o que caracteriza primordialmente as anomalias radiométricas.

Considerando numa primeira abordagem a totalidade dos dados observa-se uma anisotropia na distribuição espacial de tendência linear e de aproximadamente N45°W, crescente de NW para SE (figura 30). Essa tendência foi removida com o ajuste de uma equação polinomial de primeiro grau específica para cada um dos cenários acima referidos, ajustada automaticamente pelo software

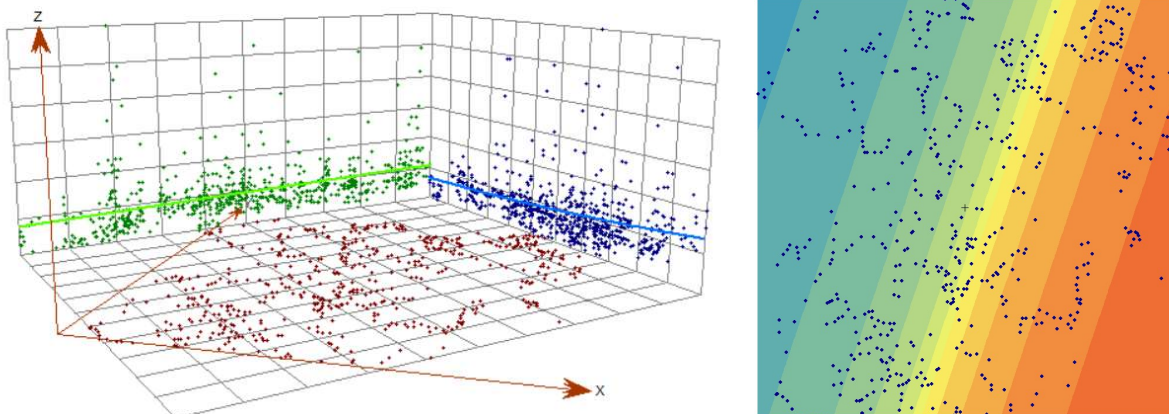
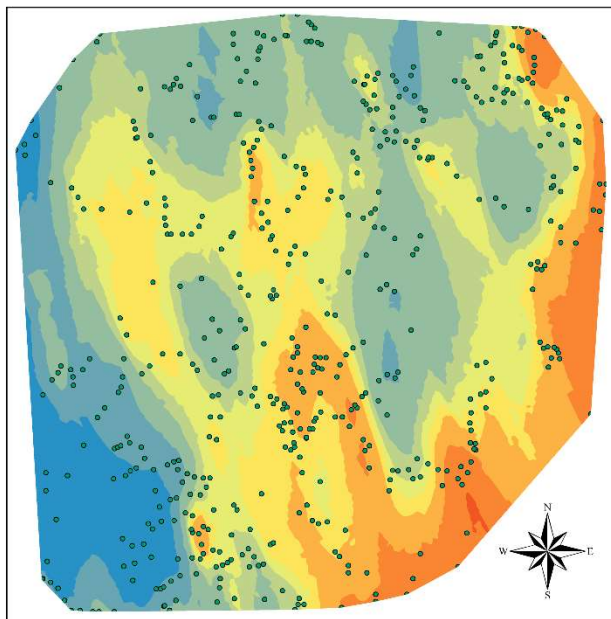


Figura 30 - Tendência regional da radiação gama total. À esquerda a projeção dos pontos amostrados em planos verticais (perpendiculares entre si) com um ângulo de 45 em relação aos eixos de coordenadas dos dados. À direita, esquema da superfície polinomial de grau um, para remoção da tendência regional.

Nas figuras 31 e 32 são apresentados os resultados do ajuste de modelos ao semivariograma, e, em cada caso, ainda o mapa de semivariograma, o mapa final e o resultado da validação cruzada. Na tabela 20 são apresentados os parâmetros definidos para cada mapa. Na tabela 21 são dados os resultados da validação cruzada.

Kriging Ordinário da radiação gama total - uso de valores mínimos

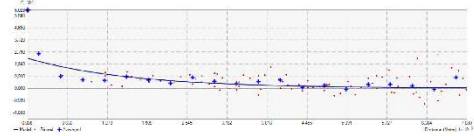


**Legenda**

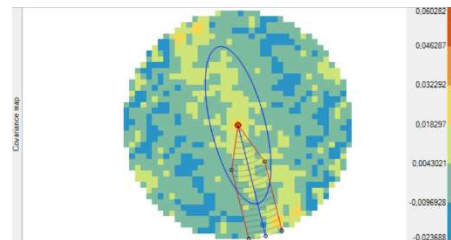
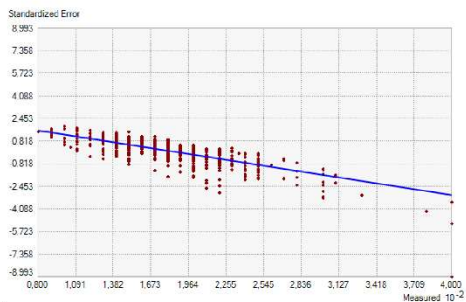
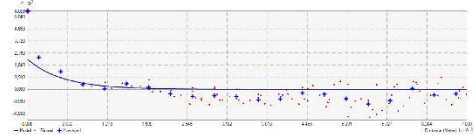
• Pontos de medição da radiação gama total	<b>Radiação Gama Total (cps)</b>	130 – 150	180 – 190	220 – 250
		150 – 170	190 – 200	250 – 300
		80 – 130	170 – 180	200 – 220
				300 – 900

Figura 31 - Interpolação da radiação gama total (cps) com utilização de apenas valores mínimos. Covariogramas segundo eixos de anisotropia. Gráfico de erro padrão. Mapa de covariância.

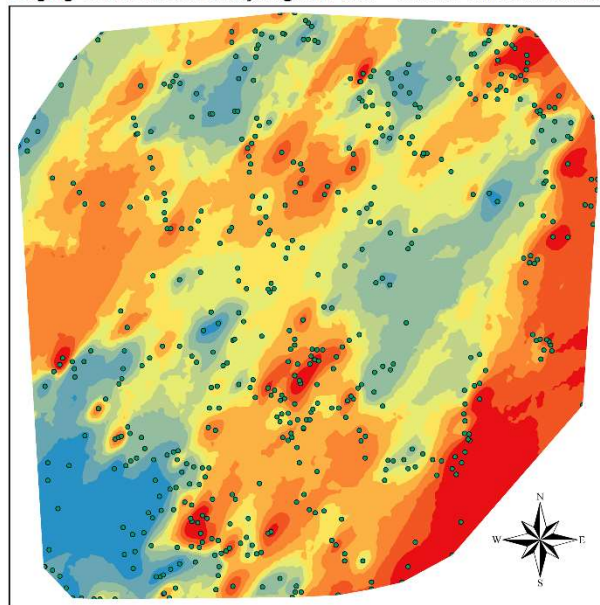
N14W - Covariograma



N76E - Covariograma



Kriging Ordinário da radiação gama total - uso de valores máximos

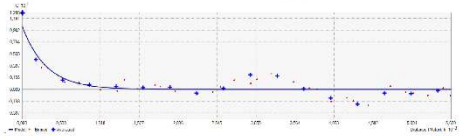


**Legenda**

• Pontos de medição da radiação gama total	<b>Radiação Gama Total (cps)</b>	130 – 150	180 – 190	220 – 250
		150 – 170	190 – 200	250 – 300
		80 – 130	170 – 180	200 – 220
				300 – 900

Figura 32 - Interpolação da radiação gama total (cps) com utilização de apenas valores máximos. Covariogramas segundo eixos de anisotropia. Gráfico de erro padrão. Mapa de covariância.

N34E - Covariograma



N56W - Covariograma

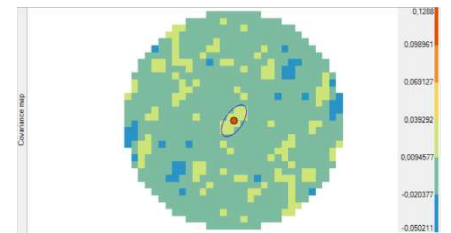
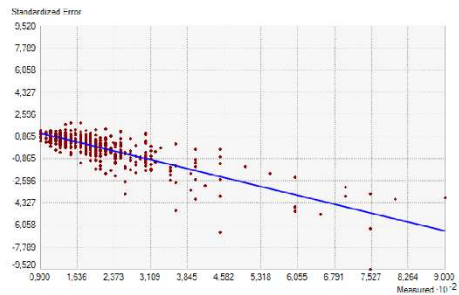
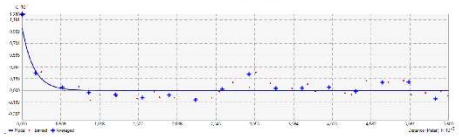




Tabela 20 – Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário, na região de Tondela.

Parâmetros utilizados no Kriging Ordinário		
	Fundo + anomalias	Fundo
Efeito pepita	0,023	0,037
Modelo	Exponencial	Exponencial
Alcance – eixo maior	932 m	4 961 m
Alcance – eixo menor	454 m	1 664 m
Direção do eixo maior	34 °	166 °
Patamar parcial	0,106	0,023
Setores de pesquisa de pontos vizinhos	4 (45 ° com os eixos)	4 (45 ° com os eixos)
Pontos vizinhos a incluir (p/ setor)	6	5
Mínimo de pontos vizinhos (p/ setor)	3	2

Tabela 21 - Resultados da validação cruzada dos modelos criados, na região de Tondela.

Resultados da validação cruzada		
	Fundo + anomalias	Fundo
Dados	535	535
Erro médio	-0,264	-0,237
Erro quadrático médio	86,508	38,619
Erro médio padronizado	-0,016	-0,000
Erro quadrático médio padronizado	1,197	1,004
Erro padrão médio	68,942	40,347

Visualmente verifica-se que o modelo que inclui os valores máximos (em choques por segundo) (figura 32), possui uma anisotropia entre os 28 e os 34° Este, com eixo maior de 932 m. O modelo correspondente ao fundo (figura 31) apresenta na análise geoespacial uma anisotropia muito mais evidente segundo N14°W. A relação eixo maior-eixo menor é ligeiramente superior quando utilizados apenas os valores máximos (2,03 por comparação com 1,85), dando origem a uma tendência para faixas de correlação ligeiramente mais estreitas (50 m de diferença).

O modelo criado apenas com valores mínimos mostra uma anisotropia claramente distinta: é muito mais evidente a anisotropia, com orientação oposta, de 14 ° Oeste, e com maiores alcances. Os modelos apresentam um enviesamento ligeiramente negativo dos erros. Este enviesamento indica uma tendência para subestimação dos dados. O erro quadrático médio ligeiramente superior a um indica uma subestimação da variabilidade calculada nos modelos.

É de notar a importância da definição do *lag*<sup>9</sup> para a análise geoespacial, tomando como exemplo o modelo correspondente ao fundo radiológico: quando muito pequeno, o

<sup>9</sup> Na análise geoespacial, *lag* é o intervalo de distâncias (espaçamento) entre pontos admitido para o cálculo dos parâmetros estatísticos para um ponto médio. Tal deve-se ao facto de, principalmente em aquisições de dados em pontos aleatórios, ser extremamente improvável encontrar dois pares de pontos separados exatamente da mesma distância,

modelo tende a apresentar uma anisotropia aproximadamente N45°E (totalmente oposta à anisotropia definida), com alcance muito reduzido; para um *lag* ainda pequeno (cerca de 100 metros), a anisotropia tende a orientar-se Norte-Sul (figura 33); com o incremento do *lag*, a anisotropia tende a orientar-se para N14°-20°W, com alcances muito maiores (figura 33).

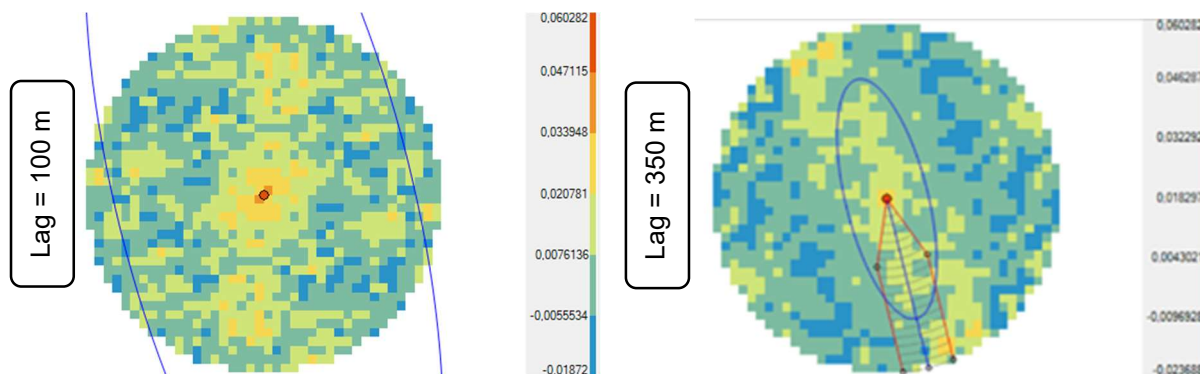


Figura 33 - Mapas de covariância para o mesmo conjunto de dados (apenas valores mínimos), mas com lags diferentes.

### 5.6.1.2 Oliveira do Hospital

Na região de Oliveira do Hospital foram executadas interpolações com base nas seguintes situações: a) dados regionais; b) dados referentes a cada um dos setores estudados e obtidos à escala 1:2 000; c) conjunto incluindo regionais e setoriais. Em todos os casos, utilizou-se quer o covariograma, quer o semivariograma, para estimar os parâmetros necessários. Sempre que possível foi dada prioridade ao covariograma, simplesmente para manter o método o mais constante possível.

Nos dados regionais existe uma ligeira tendência, com valores a crescerem de NW para SE. Contudo, dado que os dados de fundo regional foram simulados e distribuídos aleatoriamente, a tendência observada é condicionada pela maior densidade de anomalias que ocorrem na zona SE da área de estudo. Por esse motivo, não deve ser considerada como tendência regional. Na figura 34 são apresentados os resultados do ajuste ao covariograma, o mapa de covariograma, o mapa final e o resultado da validação cruzada. Na tabela 22 são apresentados os parâmetros definidos para aplicação da metodologia e na tabela 23 são dados os resultados da validação cruzada.

Na interpolação dos dados regionais não foi possível identificar nenhuma anisotropia evidente. O mapa reflete as áreas de anomalias, contudo, face ao conhecimento da área de estudo, não as define da forma expectável. Em termos absolutos, o erro é elevado (tabela 23). Todos os indicadores de erro apontam para uma subestimação geral, quer dos dados (erro

médio padronizado inferior a zero), quer da variabilidade (erro quadrático médio padronizado superior a um).

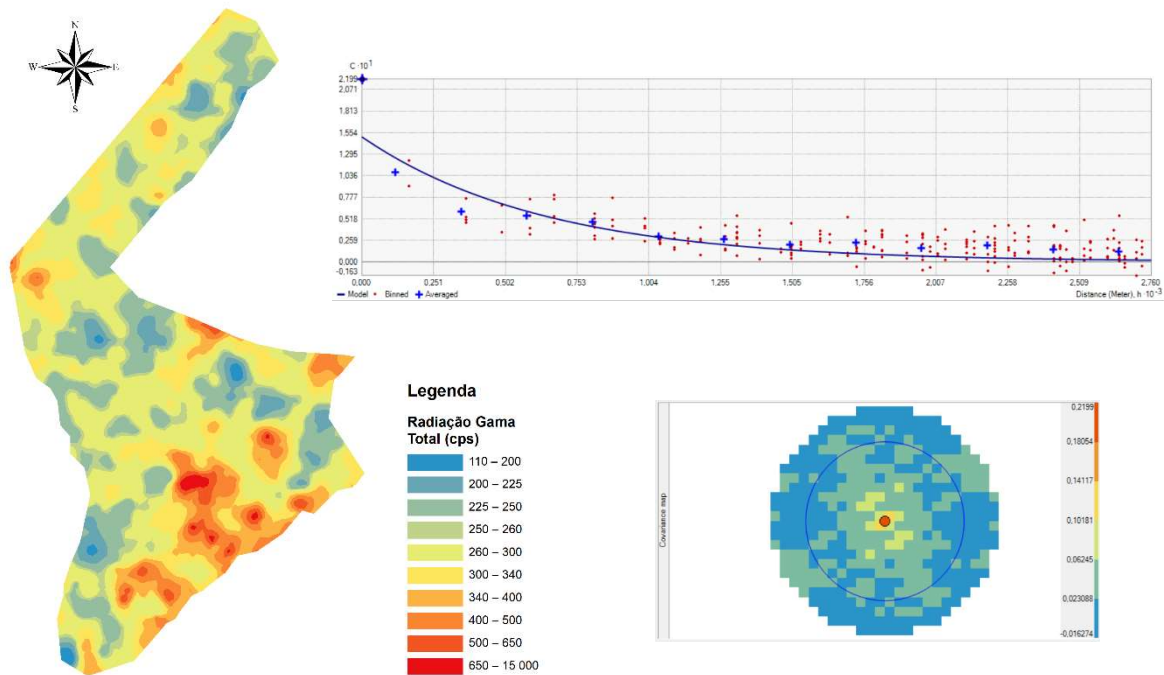


Figura 34 - Interpolação da radiação gama total (cps) dos dados regionais e simulação do fundo radiológico. Covariograma e mapa de covariância.

Tabela 22 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário aos dados regionais, na região de Oliveira do Hospital.

Parâmetros utilizados no Kriging Ordinário – Dados regionais	
Efeito pepita	0,070
Modelo	Exponencial
Alcance	1 916 m
Patamar parcial	0,150
Setores de pesquisa de pontos vizinhos	4 (45 ° com os eixos)
Pontos vizinhos a incluir (p/ setor)	5
Mínimo de pontos vizinhos (p/ setor)	2

Tabela 23 - Resultados da validação cruzada do modelo criado, dos dados regionais, na região de Oliveira do Hospital.

Resultados da validação cruzada – Dados regionais	
Dados	1 117
Erro médio	-16,903
Erro quadrático médio	318,618
Erro médio padronizado	-0,155
Erro quadrático médio padronizado	2,338
Erro padrão médio	127,324



Os sectores estudados apresentam uma grande variabilidade (figuras 35 a 38). Nalguns não foi possível identificar qualquer anisotropia intrínseca aos dados. Noutros foi possível verificar uma anisotropia de 35-45°, como na grelha de aquisição do sector B (figura 36) e na grelha SW no encrave do sector C (figura 37). Na grelha NE do sector C (figura 37) foi identificada uma anisotropia com 82°. No sector D foi identificada uma anisotropia de 55° (figura 38). Todas estas anisotropias estão espacialmente correlacionadas com estruturas segundo a mesma direção da anisotropia.

O sector A (figura 35) apresenta anomalias disseminadas no interior dos encraves do CXG, no entanto, apresenta um padrão espacial em que, a Oeste das estruturas de maior azimute (aproximadamente 45°), que dividem os metassedimentos no centro do sector, as anomalias são reduzidas drasticamente. No sector B (figura 36) as anomalias estão claramente condicionadas pelas falhas e verifica-se que ocorrem preferencialmente nas áreas de maior brechificação. No sector C (figura 37), estas ocorrem no interior dos encraves, ainda que se possa ver uma grande afinidade para com os limites destes, controlados por falhas. No sector D (figura 38), toda a área interpolada corresponde à caixa de falha e possui anomalias muito fortes.

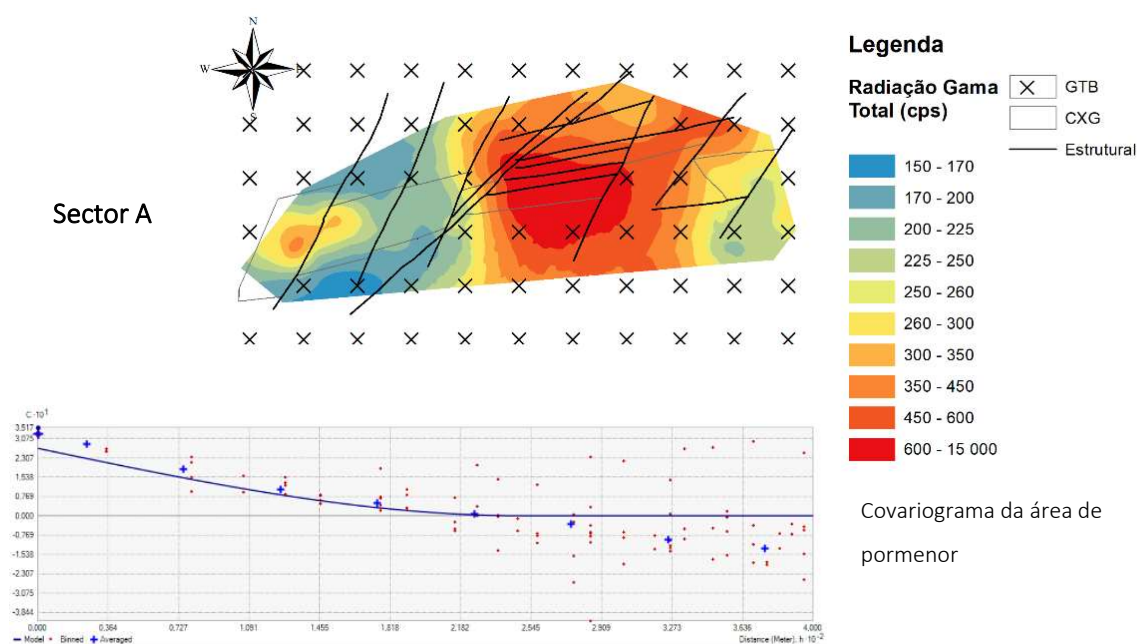


Figura 35 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) (escala 1:2 000) do sector A – Enclave de Nogueira - e covariograma.

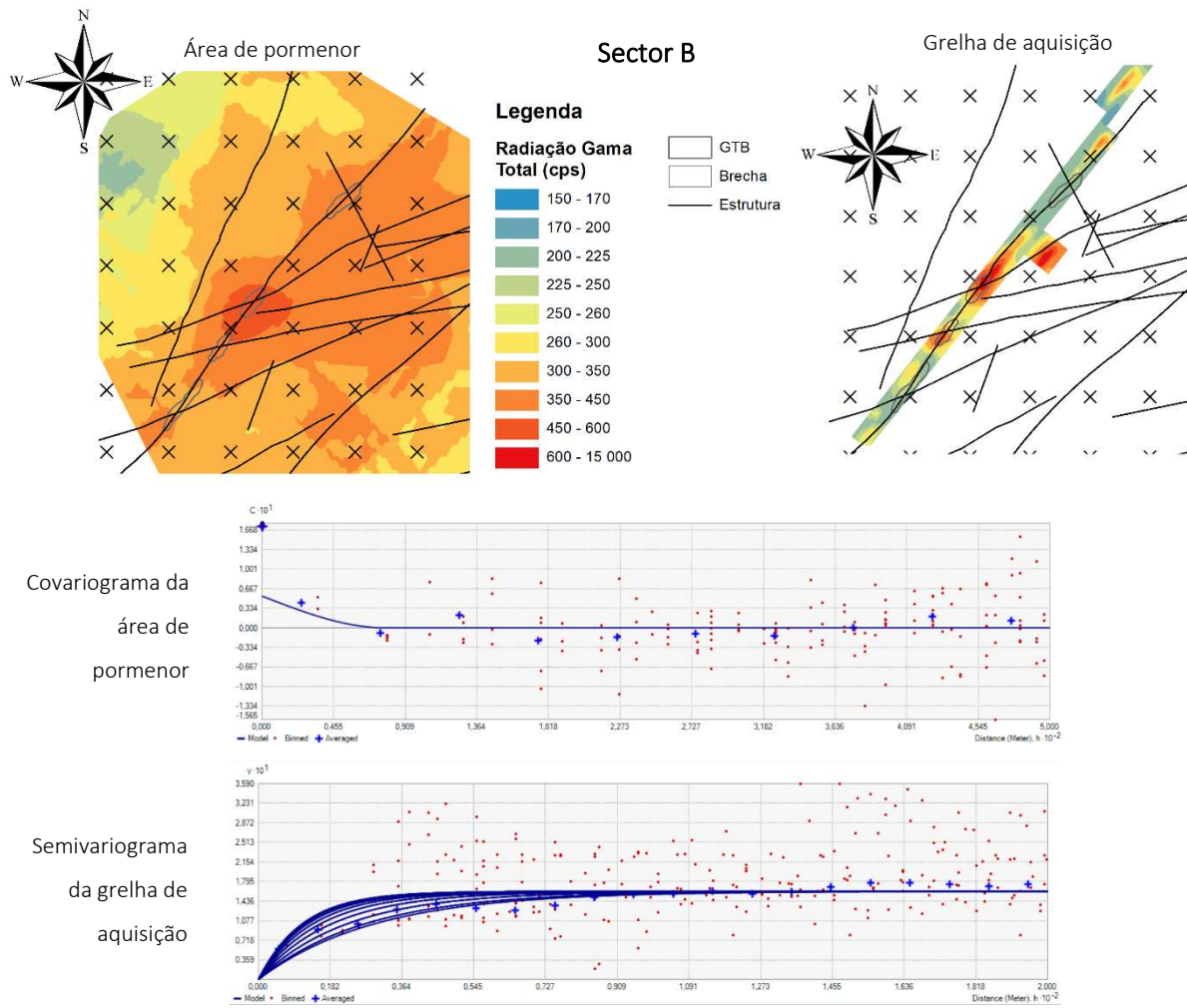
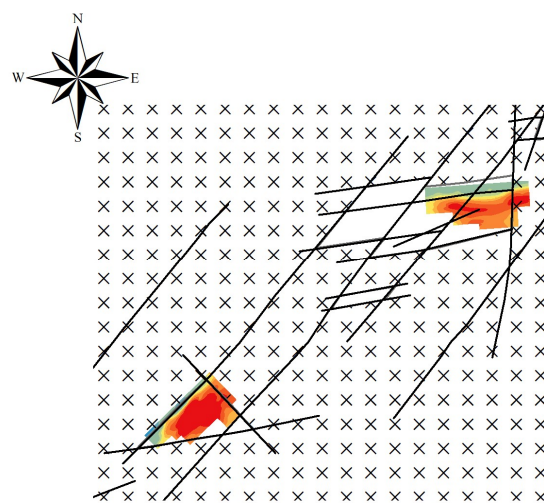
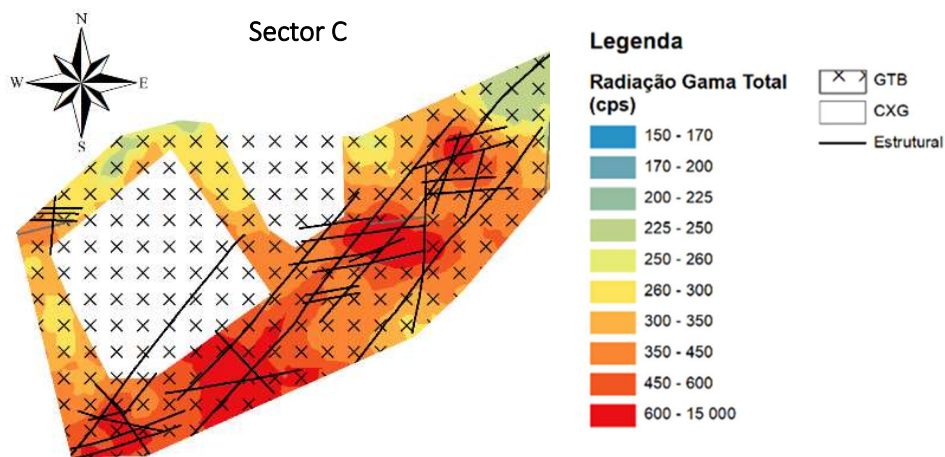
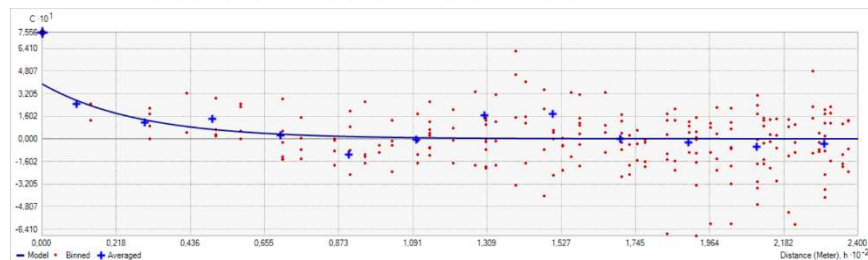


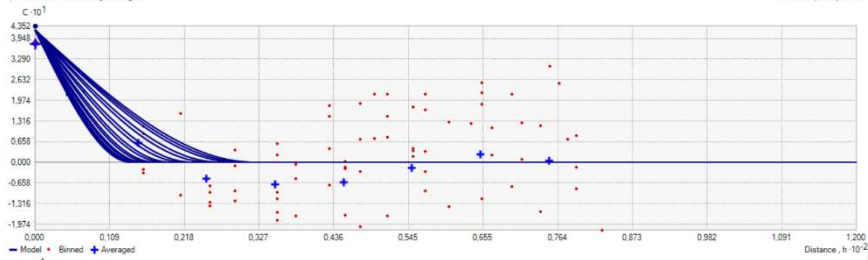
Figura 36 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) de pormenor (escala 1:2 000) e da grelha de aquisição (escala 1:1 000), para o sector B – Senhor das Almas. Covariograma e semivariograma obtidos.



Covariograma da área de pormenor



Covariograma da grelha de aquisição -SW



Semivariograma da grelha de aquisição -NE

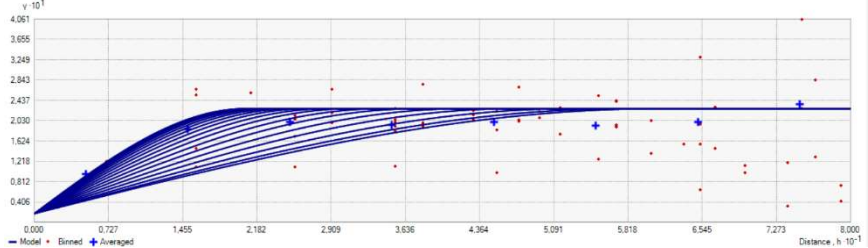


Figura 37 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) de pormenor (escala 1:2 000) e das grelhas de aquisição (escala 1:1 000), para o sector C – Vila da Baguinha. Covariogramas e semivariograma obtidos.

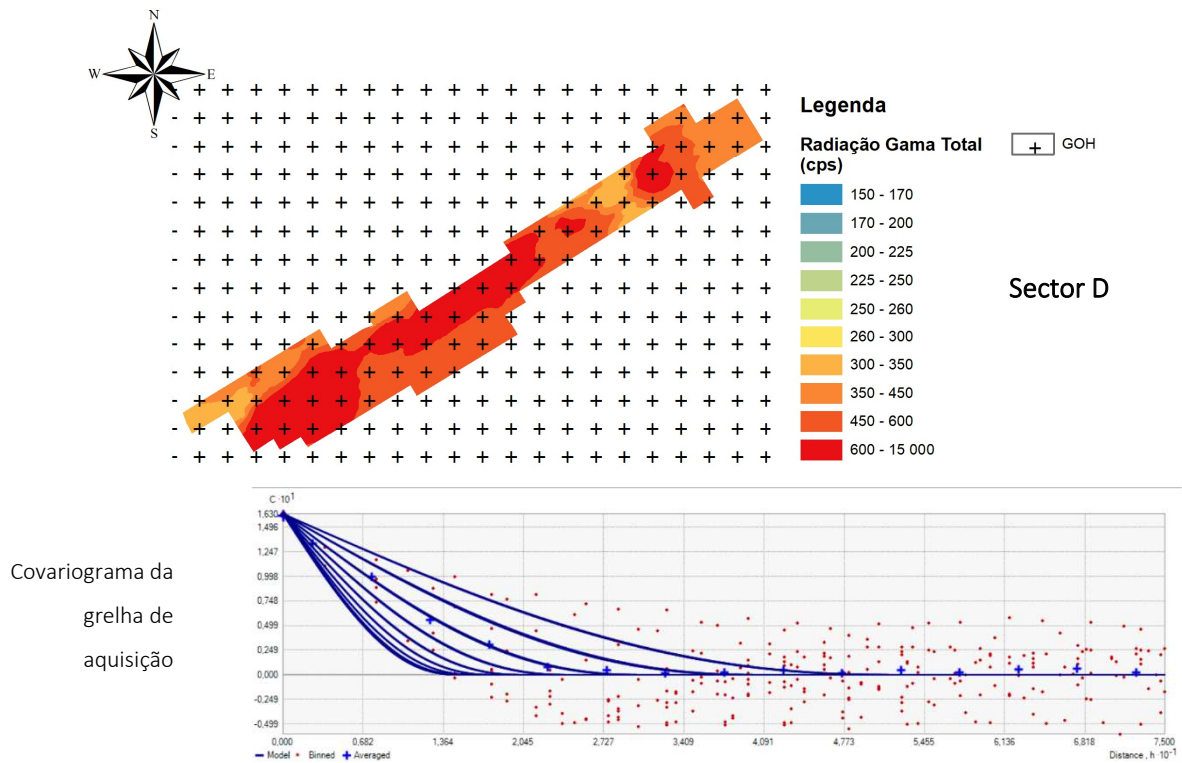


Figura 38 - Interpolação dos dados de radiação gama total (cps) (escala 1:2 000) do sector D – Chão do Prado - e covariograma.

De forma geral (tabela 24) os resultados da validação cruzada apontam para um erro significativamente inferior ao erro obtido no modelo dos dados regionais (tabela 24) e próximo do erro obtido na região de Tondela. O sector C é uma exceção, onde o erro obtido é significativamente superior (erro médio padronizado de -0,457). A variabilidade dos modelos encontra-se subestimada em todos os modelos, com exceção da grelha do sector B, onde a variabilidade é sobrestimada (erro quadrático médio padronizado de 0,870).

Tabela 24 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário e resultados da validação cruzada dos modelos de radiação gama total (cps) criados, para os dados dos sectores de pormenor e grelhas de aquisição, na região de Oliveira do Hospital.

Parâmetros utilizados no Kriging Ordinário – Dados de pormenor							
	Sector A	Sector B	Sector B (grelha)	Sector C	Sector C (grelhas)		Sector D
					Encrave NE	Encrave SW	
Efeito pepita	0,083	0,124	0,035	0,366	0,017	0,013	0,163
Modelo	Esférico	Esférico	Exponencial	Exponencial	Esférico	Esférico	Tetraesférico
Alcance – eixo maior	250 m	78 m	70 m	85 m	61 m	32 m	55 m
Alcance – eixo menor	250 m	78 m	40 m	85 m	21 m	14 m	15 m
Direção do eixo maior	-	-	35 °	-	82 °	42 °	55 °
Patamar parcial	0,269	0,054	0,105	0,389	0,209	0,422	0
Setores de pesquisa de pontos vizinhos	4 (45 ° com os eixos)						
Pontos vizinhos a incluir (p/ setor)	10	10	10	5	8	8	10
Mínimo de pontos vizinhos (p/ setor)	4	4	4	2	4	4	4
Dados	111	53	540	107	114	103	356
Erro médio	1,524	-8,328	-1,761	-224,712	-2,261	-8,479	-0,288
Erro quadrático médio	249,826	256,276	96,099	2108,959	143,576	450,592	133,682
Erro médio padronizado	0,027	-0,057	0,049	-0,457	-0,026	0,007	-0,020
Erro quadrático médio padronizado	1,179	1,592	0,870	3,858	1,357	1,353	1,267
Erro padrão médio	172,598	159,158	78,371	620,266	90,527	211,614	109,058

Quando adicionados os dados obtidos a uma escala de pormenor (1:2 000 e 1:1 000) aos dados regionais, a anisotropia torna-se mais evidente, embora com muita entropia no semivariograma (ver semivariogramas da figura 39). Esta anisotropia segue a direção de N35°E. O mapa obtido (figura 39), cujos parâmetros utilizados se encontram na tabela 25, face ao mapa com apenas dados regionais, passa a caracterizar melhor as anomalias, em concordância com a informação de campo disponível, nomeadamente a afinidade para com as estruturas geológicas. Por comparação com a interpolação dos dados regionais, o erro quadrático médio e o erro padrão médio sobem (tabela 26). Contudo o erro médio padronizado e o erro quadrático médio padronizado descem (tabela 26). Deve ser dada a importância a estes últimos, precisamente por serem padronizados, de forma ao seu valor ser independente da dimensão da variável em modelação (discutido no capítulo 4.2.2.1 – Kriging Ordinário).



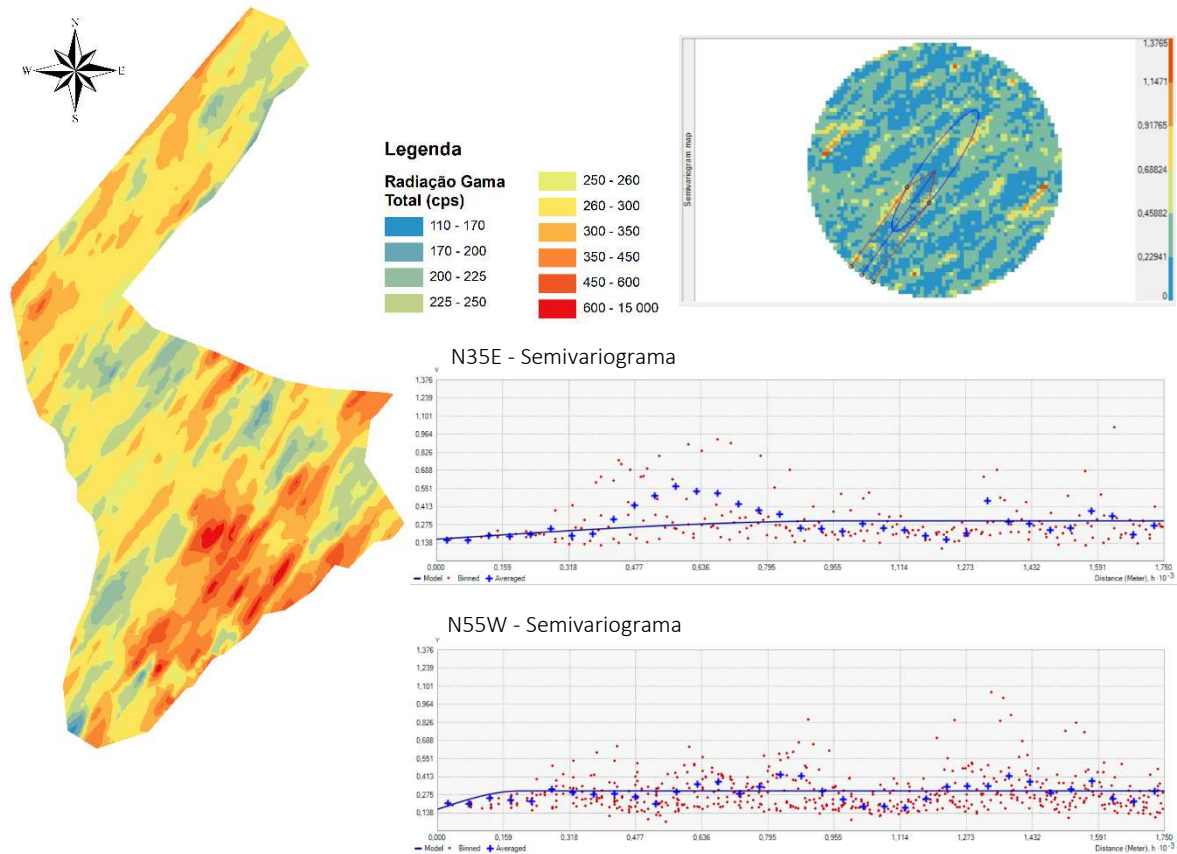


Figura 39 - Interpolação da radiação gama total (cps) dos dados regionais e de pormenor. Semivariogramas segundo os eixos anisotropia e mapa de semivariância.

Tabela 25 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário aos dados regionais e de pormenor, na região de Oliveira do Hospital.

Parâmetros utilizados no Kriging Ordinário – Dados regionais e de pormenor	
Efeito pepita	0,165
Modelo	Esférico
Alcance – eixo maior	1 000 m
Alcance – eixo menor	200 m
Direção do eixo maior	35 °
Patamar parcial	0,14
Setores de pesquisa de pontos vizinhos	4 (45 ° com os eixos)
Pontos vizinhos a incluir (p/ setor)	5
Mínimo de pontos vizinhos (p/ setor)	2

Tabela 26 - Resultados da validação cruzada do modelo criado, dos dados regionais e de pormenor, na região de Oliveira do Hospital.

Resultados da validação cruzada – Dados regionais e de pormenor	
Dados	2501
Erro médio	-10,021
Erro quadrático médio	510,032
Erro médio padronizado	-0,033
Erro quadrático médio padronizado	2,185
Erro padrão médio	215,631

## 5.6.2 Concentração de atividade de radão nos solos

### 5.6.2.1 Oliveira do Hospital

Os resultados das interpolações dos dados de concentração de atividade de radão nos solos seguem um padrão semelhante ao observado nas interpolações dos dados de radiação  $\gamma$  total, exceto a identificação de anisotropias intrínsecas aos dados, que parecem ausentes. Os resultados obtidos podem ser visualizados na figura 40.

Os erros obtidos, que podem ser consultados na tabela 27, são, de modo geral, equiparáveis aos erros obtidos nos dados de radiação  $\gamma$  total, nos diversos sectores considerados. Nos dados de concentração de atividade de radão nos solos, o sector C apresenta um erro semelhante aos restantes sectores, o que não se verificava nos dados de radiação gama total, para o mesmo sector. Contudo é de realçar que, neste sector, os dados de concentração de atividade de radão nos solos não se sobrepõem à totalidade da área que abrange os dados de radiação  $\gamma$  total.

No sector B e no sector C existe uma sobrestimação dos valores (erro médio padronizado superior a zero), enquanto no sector A verifica-se uma subestimação. No sector A e no sector C verifica-se um enviesamento positivo (sobrestimação) da variabilidade do modelo (erro quadrático médio padronizado inferior a um), enquanto no sector A verifica-se um enviesamento ligeiramente negativo.

Tabela 27 - Parâmetros utilizados para a aplicação do método de Kriging Ordinário e resultados da validação cruzada dos modelos, para os dados de concentração de atividade de radão nos solos, na região de Oliveira do Hospital.

Parâmetros utilizados no Kriging Ordinário – Radão no solo			
	Sector A	Sector B	Sector C
Efeito pepita	0,731	0,169	0,220
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico
Alcance – eixo maior	350 m	66 m	600 m
Alcance – eixo menor	350 m	66 m	600 m
Direção do eixo maior	-	-	-
Patamar parcial	0,960	0,951	6,627
Setores de pesquisa de pontos vizinhos	4 (45 ° com os eixos)		
Pontos vizinhos a incluir (p/ setor)	5	5	5
Mínimo de pontos vizinhos (p/ setor)	2	3	2
Dados	162	49	65
Erro médio	7892	-51923	-123248
Erro quadrático médio	585348	733452	1695769
Erro médio padronizado	-0,016	0,059	0,041
Erro quadrático médio padronizado	0,869	1,196	0,856
Erro padrão médio	738684	501260	1326810

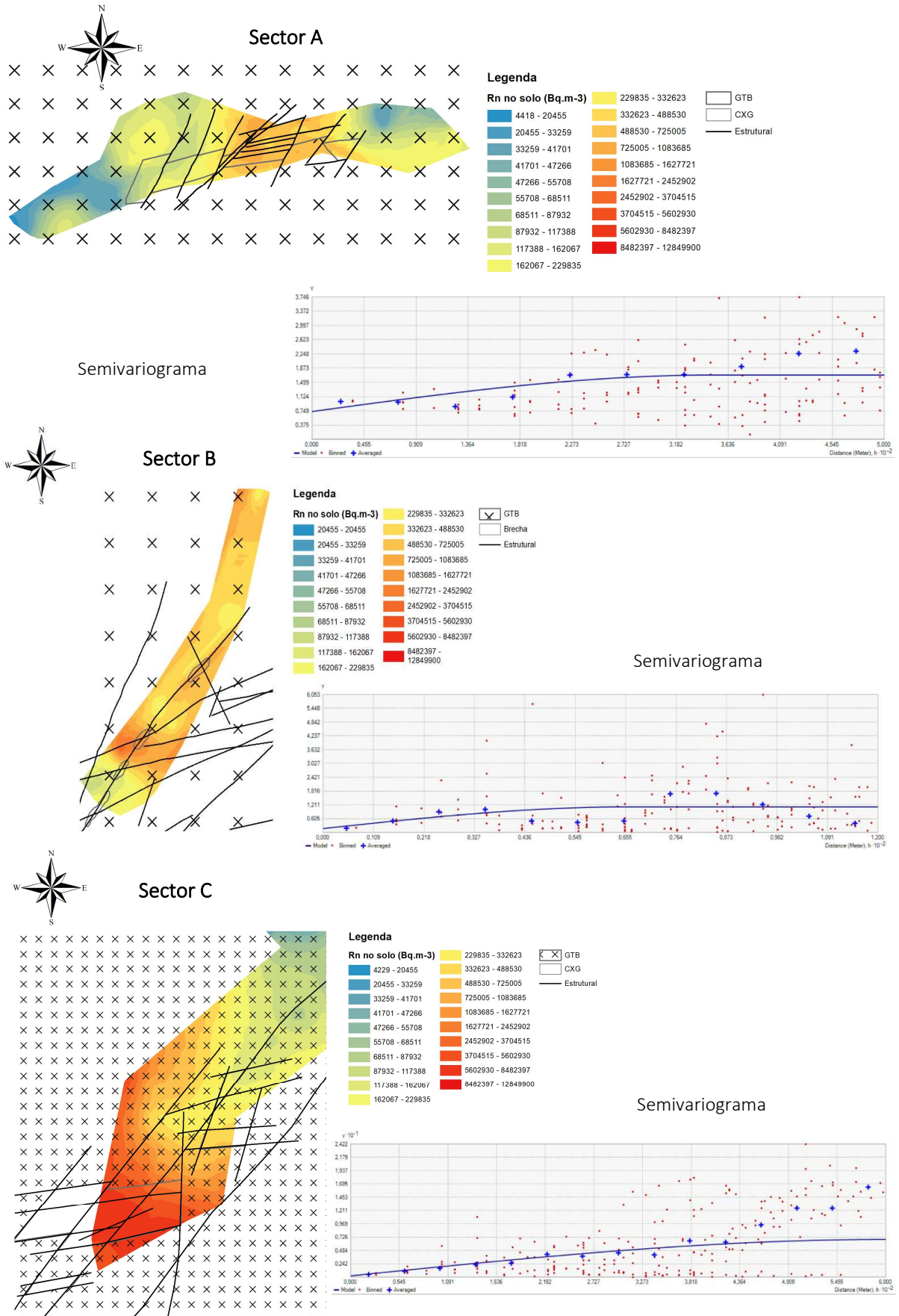


Figura 40 - Interpolação dos dados de concentração de atividade de radão nos solos nos sectores A, B e C e semivariogramas.



## 5.7 Análise da curva Característica de Operação do Recetor

### 5.7.1 Região de Tondela

Para Tondela verificou-se que a utilização de apenas os valores referentes a rés-do-chão devolviam melhores resultados na classificação. Esta observação vai de encontro à possibilidade dos dados se referirem a duas distribuições diferentes, tal como exposto na análise dos dados, mesmo que o teste estatístico de Wilcoxon-Mann-Whitney não seja significativo. A curva ROC da região de Tondela (figura 41) não apresenta a curvatura típica de uma curva ROC. Ainda assim, não inviabiliza a metodologia adotada.

Os vários parâmetros estatísticos calculados para os melhores classificadores encontram-se na tabela 28. De acordo com o estatístico Y de Youden o melhor limite de classificação são os 175 cps, com  $Y_{175} = 0,19$ . O segundo maior Y é apresentado pelo intervalo de limites 235 – 305 cps, com  $Y_{235-3} = 0,14$ . O coeficiente de correlação de Matthews segue um padrão semelhante, com  $MCC_{175} = 0,23$  e  $MCC_{235-3} = 0,19$ .

No presente trabalho optou-se pelo limite de 175 cps como classificador da área de estudo (figura 42). O limite de 175 cps proporciona uma melhor classificação de uma previsão negativa do que uma previsão positiva. É melhor a classificar uma área como de menor probabilidade de ocorrência de concentrações elevadas de radão em habitações ( $-RV_{175} = 0,40$ ) do que o limite 235 – 305 cps ( $-RV_{235-3} = 0,84$ ). Este último, pelo contrário, é melhor a classificar uma área como de maior probabilidade de ocorrência de elevadas concentrações de radão em habitações ( $+RV_{235-305} = 2,37$  e  $+RV_{175} = 1,28$ , respetivamente). Face à conhecida correlação positiva entre a radiação  $\gamma$  total e as concentrações de radão nas habitações, este padrão seria expectável. O limite 175 cps apresenta uma maior TVP, o que implica uma menor quantidade de FPs (falsos positivos). De um ponto de vista conservador, dado o fenómeno de risco para a saúde humana, deve-se ter maior segurança na definição das áreas de menor risco, evitando falsos negativos. É então também mais importante avaliar a diminuição da probabilidade de concentrações acima de  $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , pós-teste<sup>10</sup>, de uma previsão negativa, face à prevalência da área total de estudo (0,46). A TFO, neste caso de estudo, representa a percentagem de casas<sup>11</sup>, representativa dos dados originais, acima do nível de referência, nas áreas classificadas como de menor risco. Verifica-se que a

<sup>10</sup> Pós-teste é o termo utilizado para designar parâmetros estatísticos, calculados da tabela de contingência, que assumem a classificação proposta como verdadeira: é o caso por exemplo do valor preditivo positivo (VPP) e do valor preditivo negativo (VPN).

<sup>11</sup> A percentagem de casas é apenas representativa das condições de aquisição dos dados. Como a amostragem foi direcionada para habitações onde existe maior relação com o radão disponível nos solos (rés-do-chão e primeiro andar), esta percentagem será maior do que a percentagem real em função de todas as casas da área (considerando também 2<sup>os</sup>, 3<sup>os</sup>, 4<sup>os</sup>, ..., com menores concentrações).

diminuição, face à prevalência da área de estudo, para o classificador 175 cps ( $TFO_{175} = 0,25$ ) é mais acentuado do que para o outro classificador ( $TFO_{235-3} = 0,41$ ), que apresenta uma diminuição insignificante face à prevalência. No caso de uma classificação de áreas propensas a radão, semelhante à adotada na República Checa, onde uma APR é definida pelo critério  $P(C_{Rn na habitação} \geq 300 Bq \cdot m^{-3}) \geq 30\%$ , a área abaixo de 175 cps, com  $TFO = 25\%$ , seria considerada como ANPR (área não propensa a radão).

Tabela 28 - Parâmetros calculados da tabela de contingência, para análise ROC, na região de Tondela, relativos aos dois limites mais robustos.

Parâmetros da análise ROC - Tondela		
Lim	175	235 -305
TVP	0,88	0,25
TFP	0,68	0,11
ACC	0,57	0,60
VPP	0,52	0,67
VPN	0,75	0,59
Y	0,19	0,14
MCC	0,23	0,19
+RV	1,28	2,37
-RV	0,40	0,84
TFO	0,25	0,41
<b>Prevalência</b>	<b>0,46</b>	

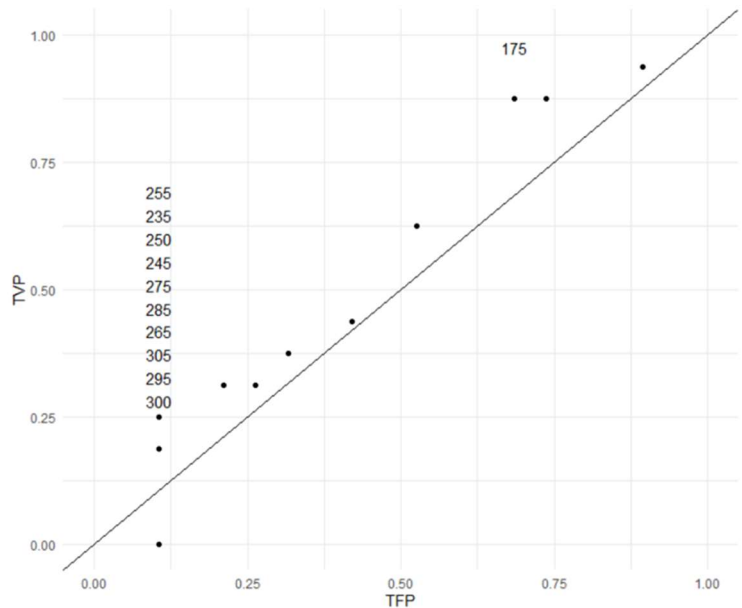
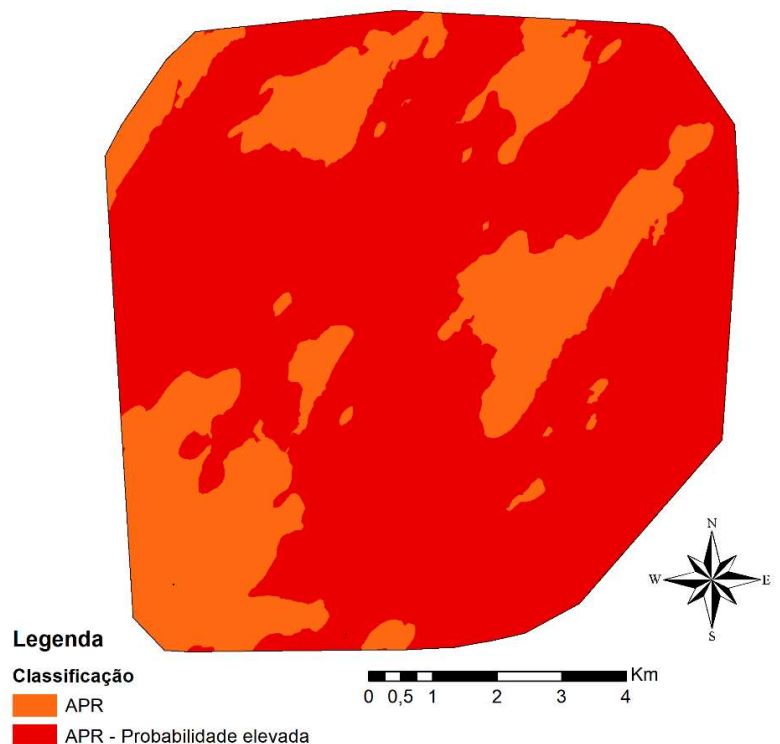


Figura 41 - Gráfico ROC para otimização da classificação da radiação gama total em função do critério definido,  $C_{Rn na habitação} \geq 300 Bq \cdot m^{-3}$ , na região de Tondela.

Figura 42 - Mapa de áreas propensas a radão na região de Tondela. A área é considerada como propensa a radão (APR) acima dos 10% de casas acima do nível de referência. A probabilidade elevada, estabelecida nesta dissertação, implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, entre os 30% e os 60%. A probabilidade muito elevada implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, acima dos 60%. As percentagens referidas são condicionadas pelas características dos dados originais, pelo que representam um cenário mais elevado do que o real.



Após a obtenção do mapa final de áreas propensas a radão nas habitações, os dados disponíveis referentes às variáveis que não foram utilizadas na classificação (teores de elementos radiogénicos e radão nos solos), foram subdivididas nas duas classes de risco obtidas. Para cada uma das classes foram calculados alguns parâmetros estatísticos básicos (tabelas 29 e 30) e foram obtidos os diagramas de caixas das figuras 43.

Tabela 29 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de elementos radiogénicos em amostras de rocha, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, para a região de Tondela. Resultado do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney à comparação da distribuição das duas classes binárias, para as duas variáveis. Abreviações: n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Med – mediana; IQR – intervalo interquartil;

Classificação	U (ppm)					Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney	Th (ppm)					Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney
	n	MG	DPG	Med	IQR		n	MG	DPG	Med	IQR	
APR	18	7,9	1,62	8,0	4,8	$p < 0,001$	18	11,9	2,29	12,0	10,8	$p = 0,468$
APR – Probabilidade Elevada	60	36,7	4,55	36,0	106,5		60	14,3	1,89	12,5	11,5	

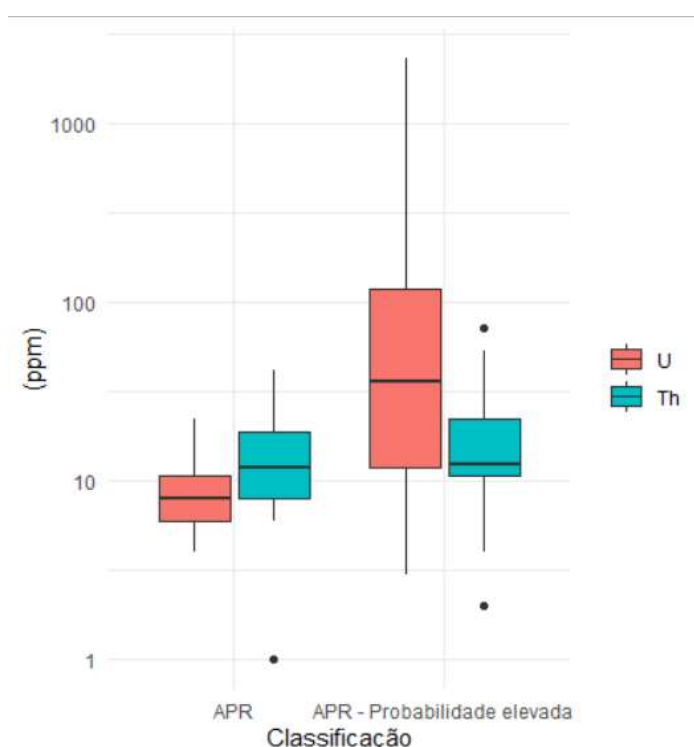


Figura 43 - Diagramas de caixas das concentrações de elementos radiogénicos, em amostras de rocha, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, da região de Tondela.

Tabela 30 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, para a região de Tondela. Resultado do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney à comparação da distribuição das duas classes binárias. Abreviações: n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Med – mediana; IQR – intervalo interquartil;

Radão nos solos ( $kBq \cdot m^{-3}$ )						Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney
Classificação	n	MG	DPG	Med	IQR	
APR	61	30,7	3,31	38,6	52,1	$p < 0,001$
APR - Probabilidade elevada	196	96,3	4,54	93,2	270,5	

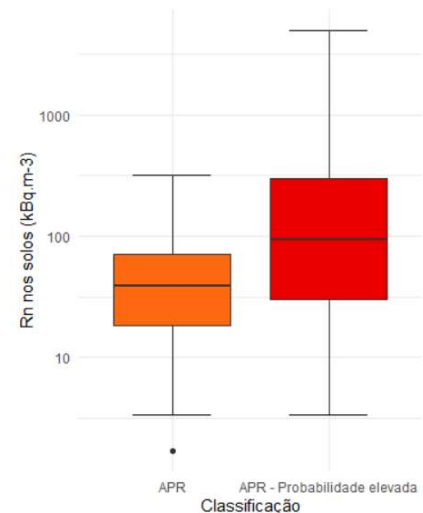


Figura 44 - Diagramas de caixas da concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, da região de Tondela.

Dos elementos radiogénicos, a distribuição de valores de Th, neste contexto geológico, é independente das classificações de radiação gama total (valor-p = 0,468), tal como já observado em função das litologias (capítulo 5.2.1). Também semelhante aos resultados expressos na mesma secção, as distribuições de valores de U das duas classes binárias devem ser consideradas como significativamente distintas (valor-p < 0,001). As distribuições dos valores de concentração de radão nos solos devem também ser consideradas como significativamente distintas (valor-p < 0,001).

### 5.7.2 Oliveira do Hospital

Na região de Oliveira do Hospital verificou-se que a utilização de valores referentes a rés-do-chão e 1º andar devolviam melhores resultados na classificação. É provável que esta observação se deva à distribuição atípica dos dados referentes ao primeiro andar, com uma grande diferença nos valores apurados e com dispersões claramente distintas abaixo e acima desse mesmo limite, situação já referida no capítulo 5.4. A curva ROC da região de Oliveira do Hospital (figura 45) já apresenta a curvatura típica de uma curva ROC.

Os limites que apresentam uma melhor classificação são os 450 e os 475 cps e os parâmetros estatísticos calculados encontram-se na tabela 31. Quer o estatístico Y de Youden ( $Y_{450} = 0,24 = Y_{475} = 0,24$ ), quer o coeficiente de correlação de Matthews ( $Y_{450} = 0,23 \approx Y_{475} = 0,24$ ), indicam um poder de classificação bastante semelhante para os dois limites.

O limite de 450 cps foi utilizado como classificador da área de estudo (figura 46). Este limite é melhor a classificar uma área como de menor probabilidade de elevadas

concentrações de radão em habitações ( $-RV_{175} = 0,67$ ) do que o limite 475 cps ( $-RV_{235-3} = 0,71$ ). O limite 450 cps apresenta uma maior TVP, o que implica uma menor quantidade de FPs. Por este motivo, adotando uma postura conservadora, é preferível adotar o limite inferior, uma vez que em termos de área não implica um aumento significativo desta (caso o aumento de área fosse significativo, poderia ser necessário uma avaliação de custo-benefício). As TFOs (percentagem de casas acima do nível de referência, nas áreas classificadas como de menor risco) dos dois classificadores são semelhantes.

Tabela 31 - Parâmetros calculados da tabela de contingência, para análise ROC, na região de Oliveira do Hospital, relativos aos dois limites mais robustos.

Parâmetros da análise ROC – Oliveira do Hospital		
Lim	450	475
TVP	0,51	0,43
TFP	0,27	0,19
ACC	0,59	0,56
VPP	0,78	0,81
VPN	0,44	0,43
Y	0,24	0,24
MCC	0,23	0,24
+RV	1,90	2,23
-RV	0,67	0,71
TFO	0,56	0,57
<b>Prevalência</b>	<b>0,65</b>	

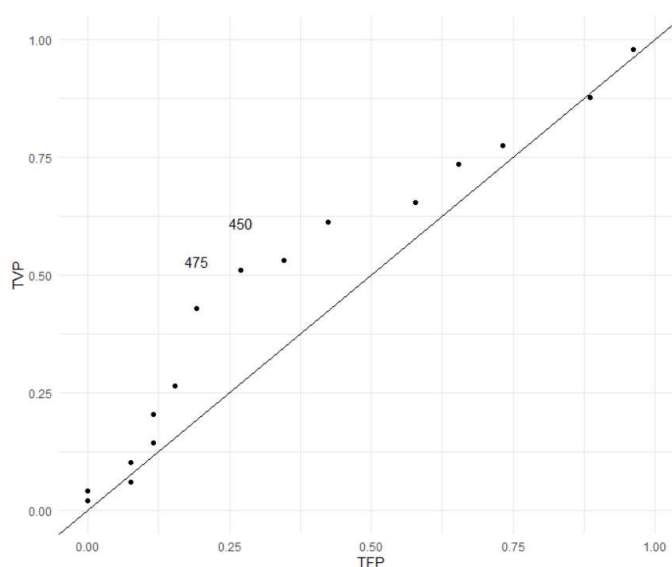


Figura 45 - Gráfico ROC para otimização da classificação da radiação gama total em função do critério definido,  $C_{Rn}$  na habitação  $\geq 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , na região de Oliveira do Hospital.

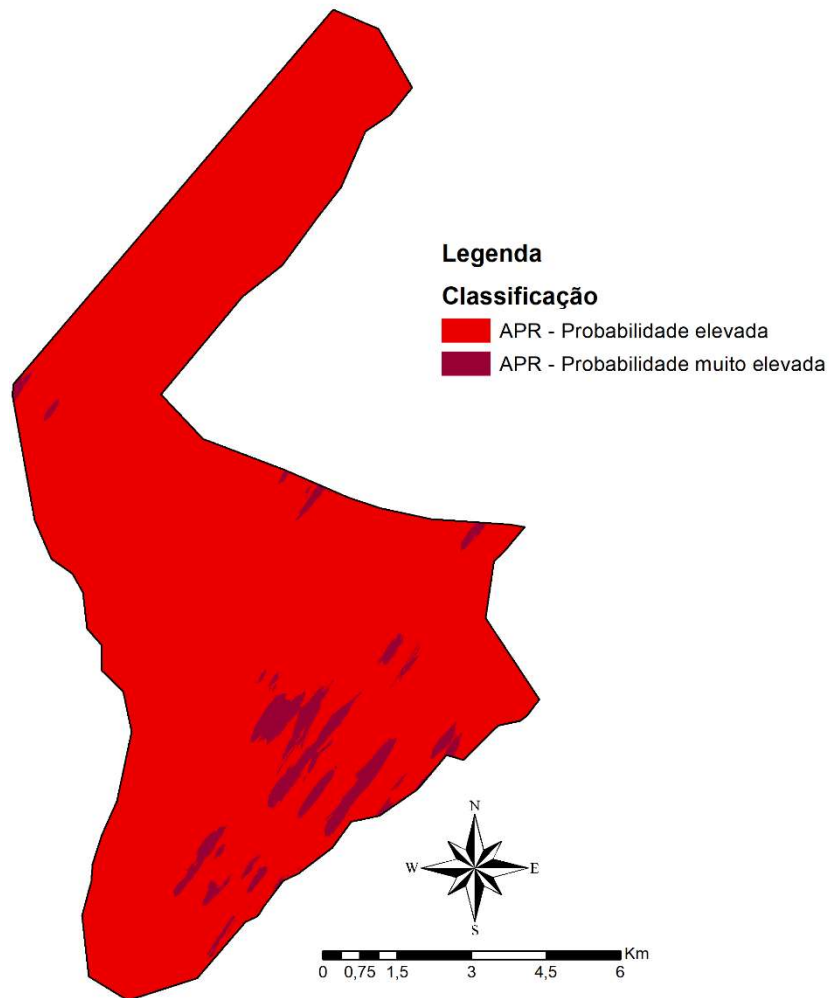


Figura 46 - Mapa de áreas propensas a radão na região de Oliveira do Hospital. A área é considerada como propensa a radão (APR) acima dos 10% de casas acima do nível de referência. A probabilidade elevada, estabelecida nesta dissertação, implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, entre os 30% e os 60%. A probabilidade muito elevada implica uma percentagem de casas acima do nível de referência, acima dos 60%. As percentagens referidas são condicionadas pelas características dos dados originais, pelo que representam um cenário mais elevado do que o real.

Após a obtenção do mapa final de áreas propensas a radão nas habitações, os dados de concentração de radão nos solos foram subdivididos segundo as duas classes binárias obtidas. Os parâmetros estatísticos básicos encontram-se na tabela 32 e os diagramas de caixas na figura 47. Pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, as distribuições dos valores devem ser consideradas como significativamente distintas (valor-p < 0,001).

Tabela 32 - Parâmetros estatísticos básicos dos dados de concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, para a região de Oliveira do Hospital. Resultado do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney à comparação da distribuição das duas classes binárias. Abreviações: n – número de dados; MG – média geométrica; DPG – desvio padrão geométrico; Med – mediana; IQR – intervalo interquartil;

Radão nos solos ( $kBq \cdot m^{-3}$ )						
Classificação	n	MG	DPG	Med	IQR	Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney
APR – Probabilidade elevada	270	128,2	4,57	136,2	255,2	$p < 0,001$
APR – Probabilidade muito elevada	106	246,3	3,94	246,1	684,3	

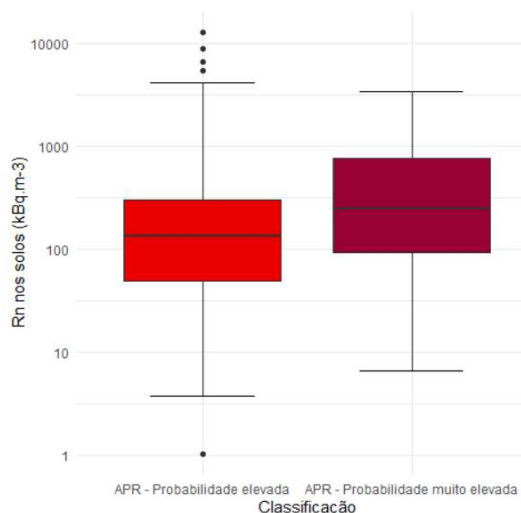


Figura 47 - Diagramas de caixas da concentração de atividade de radão nos solos, em função das classes binárias definidas pela análise ROC, da região de Oliveira do Hospital.

É intuitivo que a classificação binária para a região de Tondela não corresponde diretamente com a classificação binária de Oliveira do Hospital. É também importante realçar que uma classificação negativa, mesmo que para o critério  $C_{Rn \text{ na habitação}} \geq 300 Bq \cdot m^{-3}$ , não significa que a área não seja propensa a radão. Isto deve-se ao facto de o método não devolver uma classificação exata e calibrada em relação ao critério definido, tal como abordado no capítulo das metodologias (4.2.3). Contudo, este método aplicado a valores pontuais (e não valores médios de quadriculas), face ao significado que adquire a TFO e o VPP (percentagem de casas acima do nível de referência, nas áreas classificadas como negativas ou positivas, respetivamente), permite que sejam comparadas as áreas definidas, em função das probabilidades pós-teste. Na tabela 33 é proposta uma classificação única das áreas.

Tabela 33 – Proposta de classificação uniformizada para as duas áreas de estudo, em função das probabilidades pós-teste, provenientes de dois sistemas de classificação binária distintos.

$P(C_{Rn \text{ na habitação}} \geq 300 Bq \cdot m^{-3})$				
<b>Tondela</b>	-	0,25	0,52	-
<b>Oliveira do Hospital</b>	-	-	0,56	0,78
<b>Intervalos de classificação</b>	% < 10	10 < % < 30	30 < % < 60	% > 60
<b>Designação atribuída</b>	ANPR	APR	APR – Probabilidade elevada	APR – Probabilidade muito elevada

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

---

### 6.1 Radiação gama total e concentração de atividade de radão no solo

Nos casos onde foram identificadas várias anisotropias, através do semivariograma ou covariograma experimental, foi testado o ajuste de um covariograma (ou semivariograma), com recurso a vários modelos sobrepostos. A validade da metodologia mantém-se. Os resultados de validação do modelo foram satisfatórios, melhorando os modelos simples. Essas melhorias foram possíveis com o ajuste automático do próprio software e com recurso ao modelo de K-Bessel (Esri, 2019a). No entanto, visualmente a diferença não foi significativa. Dada a complexidade associada, quer ao ajustamento automático desenvolvido pela Esri, quer às próprias funções de Bessel, optou-se por manter o modelo o mais simples possível, tal como é prática fundamental nesta dissertação.

Na região de Oliveira do Hospital, os modelos de radão nos solos fornecem informação importante para a utilização e validação dos dados de radiação  $\gamma$  total. A boa correlação espacial entre os modelos destas duas variáveis, nos sectores estudados, é mais um indicador de que as variações na radiação  $\gamma$  total, na região, são controladas principalmente pela contribuição da cadeia de decaimento do U. Tal como verificado na análise dos dados dos elementos radiogénicos, para a área de Tondela. O que valida a utilização da radiação  $\gamma$  total como *proxy* da concentração de atividade de radão nos solos e, conseqüentemente, é correlacionável com o potencial geogénico de radão (PGR) bem como com as concentrações de radão no interior das habitações. Ainda assim, os mapas interpolados para as concentrações de radão nos solos apresentam maior suavidade comparativamente aos obtidos a partir dos dados da radiação gama, o que poderá realçar a capacidade do gás se dispersar pela porosidade das rochas, extrapolando os limites das anomalias de U. No sentido de avaliar o risco radiológico, não é, portanto, de excluir a possibilidade de num mapa de radiação  $\gamma$  total, estender as áreas que apresentam maiores valores, no sentido de considerar essa incerteza da dispersão do gás, que será sempre variável.

A associação das anomalias, de concentração de atividade de radão nos solos, com a zona central das caixas de falha, segundo perfis transversos à estrutura, como demonstrado por Salgado (2000) e por Pereira et al. (2010), não é conseguida com as interpolações a duas dimensões. No caso de Tondela não se avançou com a interpolação dos dados, uma vez que a distribuição espacial dos perfis não era a adequada para uma análise a duas dimensões. Já no caso de Oliveira do Hospital, a utilização de métodos de interpolação com todos os perfis revela-se ineficiente, para essa associação, por dois motivos: (i) como as anomalias são muitas vezes pontuais (no centro da falha, segundo um perfil transversal) os métodos de



interpolação, nomeadamente o kriging, tendem a suavizar a anomalia; (ii) a escala de valores dificulta o processo, uma vez que tipicamente cada perfil apresenta uma ordem de grandeza, muito variável, com exceção da anomalia, algumas ordens de grandeza acima. Por isso, a maior variabilidade que se verifica é de perfil para perfil e não dentro do perfil. A aglomeração dos dados em perfis é outro fator que se reflete indiretamente nos dois motivos supracitados. Dado que o espaçamento dentro de cada perfil é de muitas ordens de grandeza abaixo do espaçamento entre perfis, a correlação de dados de perfil para perfil é dificultada, sobressaindo essencialmente entre perfis. Por estes motivos, este tipo de análise beneficia mais de uma metodologia unidimensional, perfil a perfil, e correlação espacial manual entre perfis, à semelhança das técnicas de cartografia clássica.

Na região de Tondela, pelos resultados apresentados, qualquer um dos modelos de radiação  $\gamma$  total poderia ser considerado suficientemente válido, mesmo que completamente opostos. Este é o principal problema da modelação: qualquer modelo razoável é matematicamente válido, é visualmente apelativo, mas nem sempre representa de forma fidedigna o objeto pretendido. No entanto, o conhecimento dos dados e do fenómeno a modelar devem fornecer indicações da validade e aplicabilidade dos diferentes modelos. A principal discussão deverá então recair sobre qual dos modelos se deve adotar.

As diferentes tendências encontradas representam diferentes fenómenos, integrando-se aqui as associadas à distribuição primária dos elementos radiogénicos resultante da cristalização do magma, mas também as que revelam a remobilização desses mesmos elementos, em particular do U, e posterior precipitação como minerais secundários em caixas de falhas; esta acumulação leva a enriquecimentos locais gerando fundos radiométricos muito elevados (anomalias radiométricas).

No modelo onde, em caso de pontos coincidentes, foram apenas utilizados pontos máximos, a anisotropia claramente evidenciada segundo N34°E reflete também a orientação preferencial das anomalias radiométricas detetadas (ver figura 48). Os pontos anómalos são evidentemente, para qualquer distância  $h$ , aqueles que formam os pares de pontos com menor correlação (identificado através da nuvem de correlação/semivariância). Ainda assim, ao sobrepor estes pontos no modelo criado, também se ajustam ao modelo e orientam-se segundo, aproximadamente, a mesma direção de anisotropia, N27-44°E (figura 48).

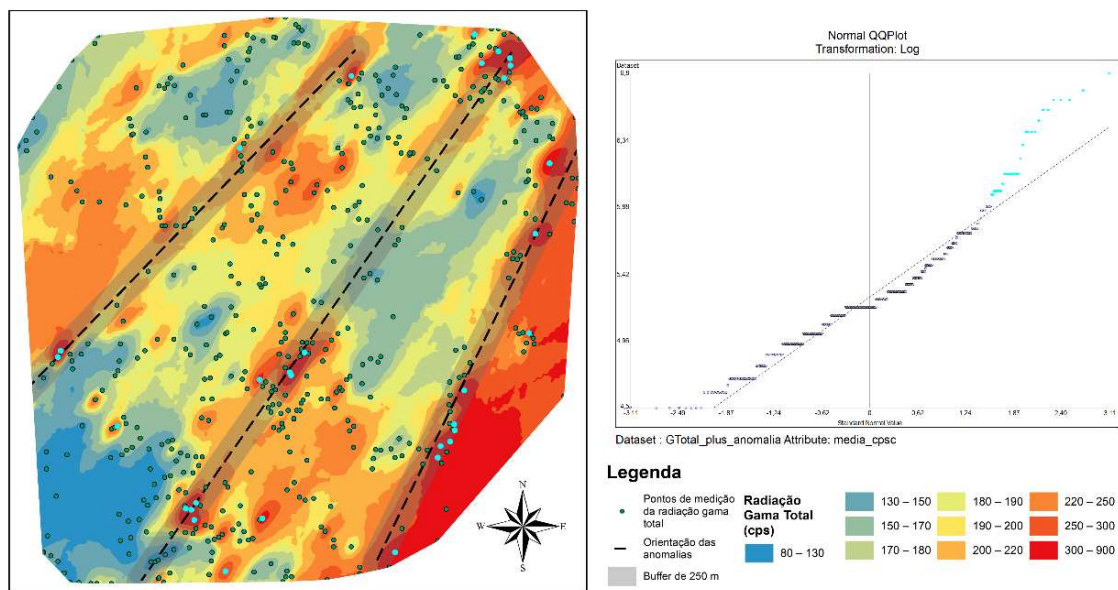


Figura 48 – Identificação espacial da tendência das anomalias. Mapa da interpolação da radiação gama total (cps) com utilização de apenas valores máximos e gráfico Q-Q dos dados originais. A azul estão identificados os pontos anómalos à distribuição total dos dados.

No caso do modelo onde, em caso de pontos coincidentes, foram apenas considerados os valores mínimos, a anisotropia oposta aos demais parece estar associada à distribuição original dos elementos radiogénicos, função da distribuição espacial das massas ígneas, uma vez que os contornos de radiação gama total são concordantes com os limites geológicos, não refletindo, assim, a tendência das anomalias e, por consequência, os enriquecimentos secundários em U. Assume-se que este modelo seja representativo da variação no fundo regional podendo os valores mais baixos estar associados aos setores das rochas graníticas que terão sido objeto de fenómenos de lixiviação do U, tendo este sido eventualmente transportado pelos corredores estruturais orientados NW-SE. Este modelo, como seria expectável, face ao reduzido número de anomalias, é o que, de todos, apresenta menor enviesamento. Contudo, e tendo em conta os objetivos deste trabalho, o centro das atenções não é, naturalmente, este modelo, uma vez que não reflete a tendência dos valores mais elevados e anómalos, estes sim importantes na definição de risco radiológico.

Tal como em Tondela, nos sectores estudados da área de Oliveira do Hospital também se pode observar o condicionamento espacial das anomalias a estruturas geológicas particulares, nomeadamente caixas de falhas, e encaves metassedimentares hospedeiros de importantes mineralizações de U.

No sector designado por A existe uma divisão clara entre a anomalia de maior expressão no bloco Este e uma zona de valores de radiação  $\gamma$  total mais reduzidos e uma menor anomalia a Oeste. A anomalia encontra-se limitada a Oeste pelas estruturas orientadas segundo  $N48^\circ E$  e ocorre na área de fracturação mais intensa, ao longo de estruturas  $N80^\circ E$

e na sua interseção com as estruturas N48°E. Estas observações demonstram que a existência de encraves não justifica na totalidade a ocorrência de anomalias, quando estes estão presentes, tal como observado em Tondela. Existem duas possíveis justificações e, do ponto de vista geológico, é provável que ambas ocorram. Os encraves metassedimentares pertencem ao Grupo das Beiras e por isso é expectável que existam encraves com natureza mais xistosa e outros de natureza mais metagrauváquica. Tal contraste pode influenciar a precipitação do U de forma preferencial numa das litologias. Outra hipótese é o controlo estrutural das anomalias. Os próprios encraves metassedimentares são controlados pelas estruturas tectónicas. Como demonstrado na análise de dados, as anomalias têm, estatisticamente, a mesma ordem de grandeza, com e sem encraves presentes, sendo que as estruturas planares são a única constante nos dois cenários. Tais observações sugerem que em primeiro lugar exista um controlo estrutural e depois também um controlo litológico. As anomalias tendem a ocorrer de forma disseminada nos encraves, favorecidas pela fracturação, que proporciona a percolação de fluidos enriquecidos através destes encraves, que originalmente não o proporcionam.

No sector B, onde não ocorrem encraves, a anomalia encontra-se associada a uma estrutura planar, grosseiramente orientada segundo N35°E. Contudo a anomalia não tem a mesma intensidade ao longo da estrutura, ocorrendo as de maior fundo radiométrico em associação com brechas, na interseção desta estrutura (N35°E) com outras estruturas, nomeadamente segundo N80°E e N68°E.

No sector C, onde as anomalias são de maior intensidade, a fracturação é também ela mais densa. A família de estruturas N35°E é a mais expressiva e conecta os vários encraves. Já a família N75-80°E encontra-se espacialmente limitada aos encraves. A primeira família, N35°E, provoca ruturas horizontais claras nos encraves, podendo ser estruturas de enraizamento mais profundo, enquanto a família N75-80°E parece relacionada com a compensação das tensões locais, provocadas pela presença do corpo metassedimentar. Contudo, é apenas uma hipótese e, como tal, seriam necessários estudos complementares de campo para a confirmar. O certo é serem aquelas orientações estruturais o principal controlo das anomalias. Com suporte na informação detalhada obtida nos setores onde afloram os encraves verifica-se que as anomalias se dispersam por todo o corpo metassedimentar. Neste caso, as falhas principais controlam os limites dos encraves e serão as secundárias a fazer o controlo interno a que se associa, eventualmente, disseminação no próprio corpo sedimentar.

O sector D é um caso especial, mas muito frequente no contexto geológico da região. Diz respeito a uma larga caixa de falha, com mais de 40 metros de largura. As caixas de falha são caracterizadas por intenso esmagamento e/ou fragmentação de extensão transversal muito variável, que promove a alteração da rocha e constitui um bom reservatório para a

deposição secundária de urânio. Este fenómeno é claramente evidenciado neste sector, onde ocorre mineralização de urânio (Pereira & Neves, 2012). As caixas de falha, como esta, apresentam uma estrutura própria, com aumento da intensidade dos processos do exterior para o centro da caixa de falha, nomeadamente da fracturação e esmagamento. No centro desta caixa de falha encontra-se quartzo, por vezes fortemente milonitizado. Dado que os solos na região são muito pouco desenvolvidos, este tipo de estruturas, ao promoverem as condições para incrementar os processos de meteorização, produzem solos de maior espessura e por isso aproveitados para agricultura. Situação para a qual deve ser tido um cuidado especial no mapeamento de áreas de risco.

O fundo radiológico da região de Oliveira do Hospital, ainda que simulado, facto é que coincide com observações de campo: as principais estruturas planares (N35°E) controlam também a estruturação do fundo radiológico; a maior área de fundo regional mais reduzido, na zona central, a NW das maiores anomalias, coincide com uma área onde o granito de Oliveira do Hospital se encontra pouco alterado e onde foram identificadas ocorrências de um granito, frequentemente alterado, mais moscovítico-biotítico, de grão fino a médio, mais antigo que os demais, identificado como G1 por Silva (1995). Postas estas considerações, no entanto não é possível, neste momento, concluir se este padrão coincidente é uma realização (sentido matemático do termo) de um modelo aleatório, após a krigagem, ou se o facto de não existirem anomalias nessa área faz com que os resultados da krigagem devolvam sempre um padrão semelhante, independente da simulação do fundo radiológico. Dadas as metodologias adotadas, com o desenvolvimento de uma implementação ainda mais automatizada, num trabalho futuro pode ser estimada a incerteza, através de simulações de Monte Carlo.

Nas interpolações de radiação  $\gamma$  total da região de Oliveira do Hospital, a importância da escala de trabalho torna-se evidente. Existe um condicionamento provocado pela escala, não só na própria cartografia das anomalias, como igualmente importante, na cartografia geológica. À medida que a escala diminui, a definição aumenta, tal como a variabilidade geológica. O contexto geológico também se torna mais complexo, bem como a componente estrutural. Na área de estudo, por exemplo, o que à escala 1:25 000 era um único alinhamento estrutural de grande extensão, à escala de 1:2 000 é um conjunto complexo de sistemas, com orientações distintas, de intensa fracturação composta por segmentos paralelos entre si. Cada um dos sistemas pode ter intensidade de fracturação, separação, extensão e profundidade de enraizamento variáveis, fruto não só do seu contexto de formação, mas também das diferentes evoluções tectónicas. Esta é uma evidência dos resultados estatísticos de outros autores, através da análise de variância (ANOVA). Por exemplo, Bossew et al. (2008), identificaram um aumento da fração da variabilidade explicada pela geologia, de 4,7% para 11,2%, com a redução da generalização da variável categórica. Os resultados de Appleton & Miles (2010) demonstram, para um cartografia à escala 1:50 000 em Inglaterra e País de

Gales, divididos em sectores, um aumento da fração da variabilidade explicada pela geologia, de 8% (2 – 15 %) para 24% (15 – 37 %), em média, com a redução da generalização das unidades geológicas. Nesse mesmo trabalho, quando comparada a região de Inglaterra e País de Gales com a região da Irlanda do Norte, com escalas distintas de 1:50 000 e 1:250 000, respetivamente, verifica-se que a fração da variabilidade explicada pela geologia é superior em Inglaterra e País de Gales (24,6%), por comparação com a Irlanda do Norte (10,5%).

Por comparação da figura 34 com a figura 39 e da tabela 23 com a 26 (capítulo 5.6.1.2), na região de Oliveira do Hospital, verifica-se que a adição dos valores obtidos à escala local (setores A a D) aos dados de âmbito regional, induz uma ligeira melhoria dos parâmetros de erro calculados. Dado que a validação cruzada é efetuada com todos os valores, é difícil comprovar se essa melhoria se reflete numa melhoria geral do modelo a nível regional, ou se essa melhoria estatística se deve à inclusão propriamente dita dos dados de pormenor e que continuem a devolver erros menores, tal como nas interpolações de pormenor. O mais provável é uma combinação de ambos. Mais importante, observa-se uma melhoria significativa a nível estrutural. Foi possível identificar uma anisotropia espacial orientada maioritariamente segundo N35°E, conforme com idêntica anisotropia identificada em Tondela, de N34°E, em ambos os casos a condicionarem as mineralizações de U (Pereira et al., 2010).

Para ocorrer uma anisotropia na correlação dos valores, em função de uma distância  $h$ , é expectável que tal seja controlado por um fenómeno físico direcional. As falhas, caixas de falhas e fraturas, têm grande importância na remobilização e reprecipitação de radionuclídeos, da cadeia de decaimento do  $U^{238}$  (Varley & Flowers, 1993; Neiva & Dias, 2010; Pereira et al., 2010; Costa et al., 2017; Miklyaev et al., 2020). O resultado das interpolações adotadas, também demonstra o controlo deste tipo de estruturas sobre a radiação gama total. Nomeadamente aquelas segundo a orientação da anisotropia identificada (aproximadamente N34°E). É sobre estas (ou limitadas por elas) que se encontram as principais anomalias.

Nalgumas destas estruturas, em Oliveira do Hospital, foi observado urânio no material de enchimento das caixas de falhas (Neves et al., 2010). Esta orientação condiz também com a principal orientação das estruturas mineralizadas, que acomodam os minério uraníferos na região das Beiras (Neiva & Dias, 2010 e referências aí citadas; Neves et al., 2010). A outra família de estruturas planares que apresentam valores mais elevados, tem uma orientação N75°E (Pereira et al., 2010). Embora esta orientação não seja a orientação da anisotropia identificada na região de Tondela ou Oliveira do Hospital, também nestas regiões se observam muitas falhas, segundo essa orientação, que interseccionam as anomalias.

As anomalias identificadas, para além de se encontrarem preferencialmente sobre estruturas segundo N35°E mostram, contudo, alguma descontinuidade ao longo dessas mesmas estruturas. Uma análise mais detalhada da distribuição daquelas anomalias (ver

figuras 49 e 50), juntamente com a informação estrutural disponível, mostra que elas ocorrem na interseção com outras estruturas planares, de direção preferencial ENE e NE, ou mesmo com os contactos litológicos. Indubitavelmente as anomalias situam-se em zonas com elevada densidade de estruturas planares. A intensa fracturação promove o esmagamento e brechificação do material intersetado, aumentando a permeabilidade. Tal favorece a circulação de fluidos, com capacidade de transporte e precipitação de radioisótopos, como também oferece uma maior área de contacto para a precipitação dos mesmos radioisótopos.

Têm sido propostos vários modelos para a génese das mineralizações uraníferas da região (Neiva & Dias, 2010). Até à data, parece razoavelmente aceite a sinergia entre fluidos hidrotermais de diferenciação granítica e fluidos de natureza meteórica. Estes últimos tiveram certamente um papel preponderante para a remobilização de elementos, nomeadamente U, através de canais como as caixas de falhas. Não é de excluir que esses fluidos remobilizadores de U tenham uma idade recente, ou até mesmo continuem a ter um papel ativo. Um estudo preliminar de Neves et al. (1997), através da técnica de *fission track*, sugere que, no granito de Passos, com  $282 \pm 2$  Ma (K-Ar) (Torradeira, Viseu), o U precipitado em microfissuras, não terá idade superior a 0,9 Ma ( $0,45 \pm 0,45$  Ma), para a concentração mínima observada em microfissuras, de 335 ppm de U, ou  $0,2 \pm 0,2$  Ma, para concentrações de 1000 ppm de U, observadas com alguma frequência).

Comparando os resultados obtidos relativos aos valores de radiação  $\gamma$  total em ambas as regiões em estudo (figuras 49 e 50) verifica-se que a área de Oliveira do Hospital apresenta um fundo radiológico muito superior ao da área de Tondela. Pelo facto do fundo ser mais elevado, também as anomalias são mais frequentes e intensas do que em Tondela, bem como apresentam uma dispersão significativamente maior. Dada a correlação positiva entre radiação  $\gamma$ , com origem na cadeia de decaimento do U, e as concentrações de atividade de radão nos solos, bem como as concentrações de atividade de radão nas habitações, é expectável que a área de Oliveira do Hospital esteja sujeita a um risco natural mais elevado.

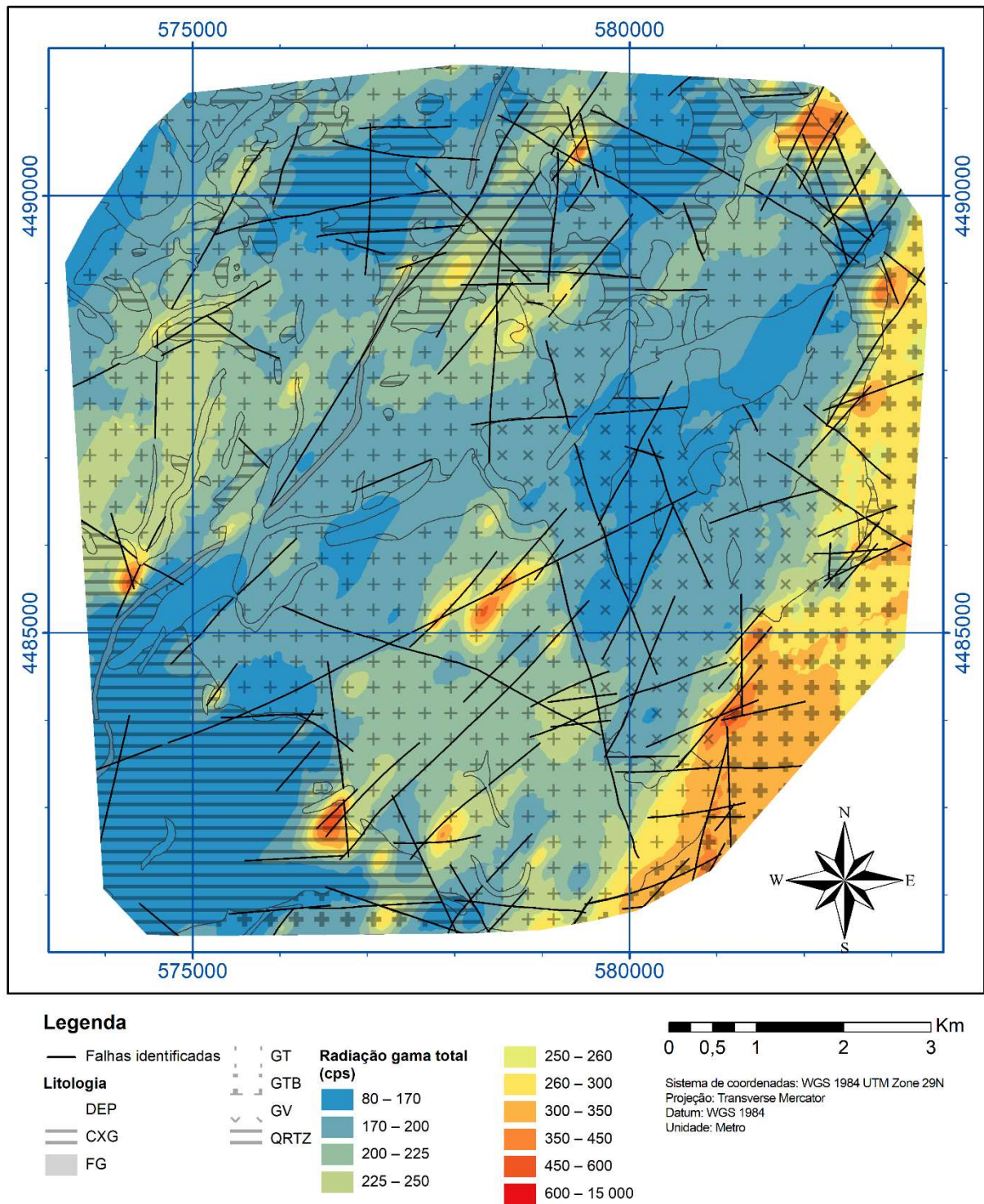
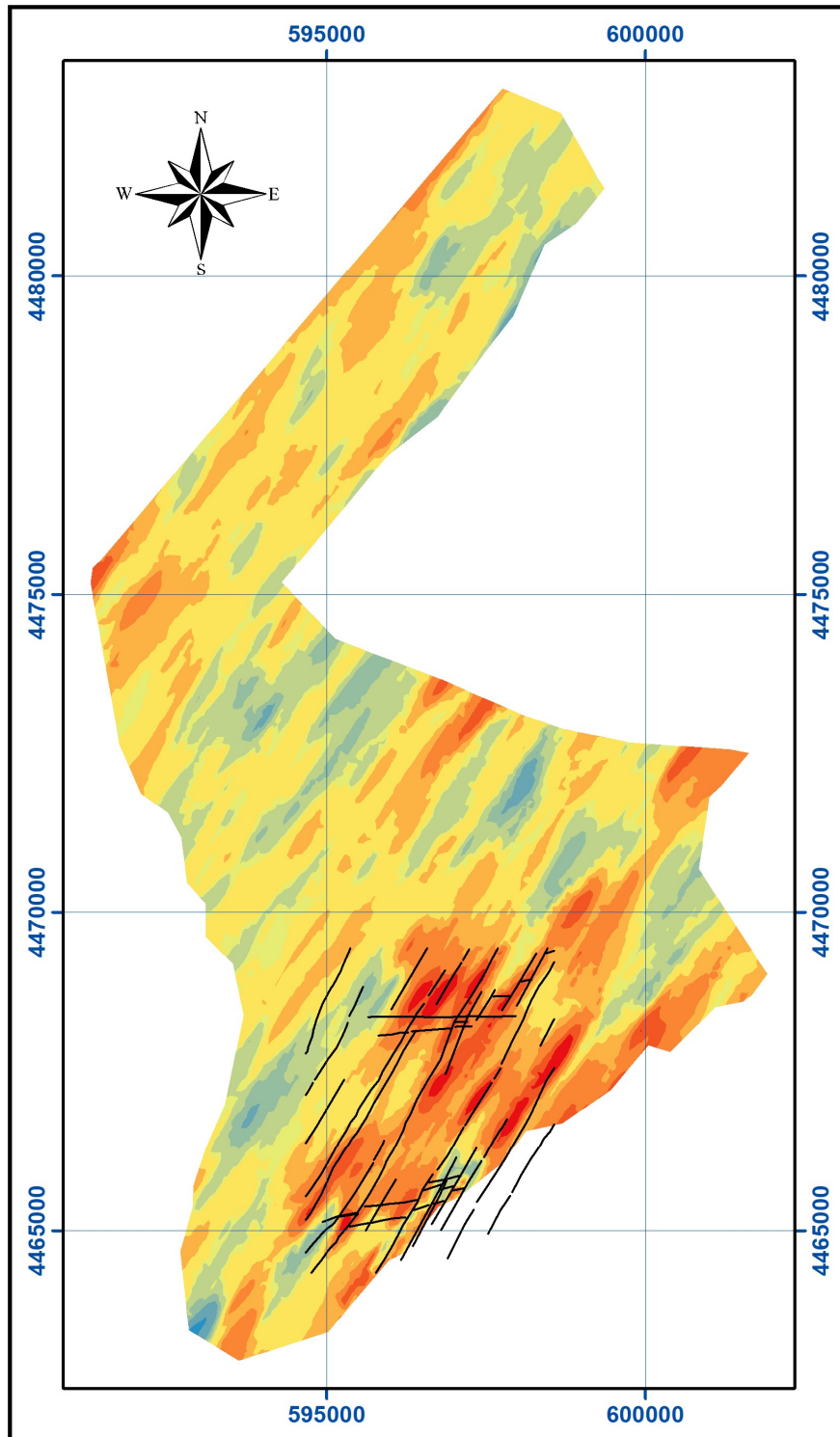


Figura 49 - Resultado da interpolação da radiação gama total, na região de Tondela.





**Legenda**

- |                                  |           |           |              |
|----------------------------------|-----------|-----------|--------------|
| — Estruturas identificadas       | 170 - 200 | 250 - 260 | 350 - 450    |
| <b>Radiação gama total (cps)</b> | 200 - 225 | 260 - 300 | 450 - 600    |
|                                  | 80 - 170  | 300 - 350 | 600 - 15 000 |
|                                  | 225 - 250 |           |              |

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 29N  
 Projeção: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 Unidade: Metro

Figura 50 - Resultado da interpolação da radiação gama total, na região de Oliveira do Hospital.



## 6.2 Análise da curva Característica de Operação do Recetor e mapas de áreas propensas a radão

Na região de Tondela existe claramente uma amostragem limitada dos dados de concentração de atividade de radão em habitações. Nomeadamente em áreas onde aflora o CXG e em áreas que apresentam valores de radiação gama total relativamente médios a elevados (235 cps a 305 cps). Na área de Oliveira do Hospital, os dados de concentração de atividade de radão em habitações encontram-se muito concentrados nas zonas de elevada anomalia. Contudo é o reflexo da própria aglomeração de habitações nas localidades, nomeadamente no centro urbano de Oliveira do Hospital, e que coincidem com áreas que apresentam anomalias elevadas de radiação  $\gamma$  total. Seria importante aumentar a amostragem nas zonas de fundo radiológico baixo.

De acordo com os resultados obtidos em no capítulo 5.7 definiram-se diferentes classes de risco em ambas as regiões (APR, APR – probabilidade elevada e APR – probabilidade muito elevada) tendo-se comparado os valores de tendência central e de dispersão referentes a variáveis como os teores de elementos radiogénicos e radão nos solos, usando para o efeito testes de significância. Para o primeiro caso, o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney indicou que as duas classes devem ser aceites como significativamente diferentes em termos de concentração de U nas rochas, mas deve ser considerada uma distribuição comum dos dados de Th. Dado que as classes refletem diretamente a variabilidade espacial da radiação gama, estes resultados apoiam a hipótese de que variabilidade da radiação gama total, na área de estudo, é devida à cadeia de decaimento do U. Pelo mesmo teste estatístico, os dados de concentração de atividade de  $^{222}\text{Rn}$  nos solos, referentes às duas classes, devem ser consideradas como significativamente diferentes, em ambas as regiões de estudo. Também este resultado é fruto da boa correlação que existe entre a variável testada e a radiação gama total. É bem evidente que todas as variáveis apresentam uma tendência central mais elevada, bem como uma maior dispersão, nas classes mais elevadas de cada região (à exceção da variável concentração de Th), o que reflete a natureza anómala destas áreas.

Embora as curvas ROC obtidas, em especial para a região de Tondela, não sejam suaves e completas como as curvas no trabalho de Bossew (2014), o poder de classificação dos limites otimizados é apenas ligeiramente inferior. Tondela e Oliveira do Hospital apresentam um MCC de 0,23, enquanto no trabalho de Bossew (2014) foi obtido um MCC de

0,31. Os Y de Youden, nesta dissertação são de 0,19 e 0,24, enquanto em Bossew (2014) foram obtidos Y de Youden de 0,33 e 0,47, consoante o critério definido. A exatidão, embora não seja um parâmetro muito relevante neste tipo de análise, foi em Oliveira do Hospital foi 0,59 e em Tondela, mais baixa, foi 0,57. No trabalho de Bossew (2014) foi obtida uma exatidão de 0,79, significativamente mais elevada, mas também uma exatidão de 0,65, conforme o critério definido. A relativamente elevada taxa de classificação errada já foi abordada por Bossew (2014). O autor atribui responsabilidades à fraca correlação, no seu caso, entre o potencial geogénico (concentrações de atividade de radão nos solos e permeabilidade) e as concentrações de atividade de radão nas habitações. Isto deve-se a todos os outros fatores, que não são contabilizados ou são aleatórios, à escala temporal de trabalho, e que influenciam a variabilidade do radão nas habitações. A importância desses fatores foi discutida nos capítulos 1.2 e 2. São motivos semelhantes que aqui se apontam para justificar a ligeira redução do poder classificador da metodologia aqui apresentada comparativamente ao referido nos trabalhos de Bossew (2014). A radiação gama possui naturalmente menor correlação para com as concentrações de radão nas habitações, do que o potencial geogénico de radão, principalmente porque a permeabilidade dos solos, considerada no potencial geogénico de radão, é importante na correlação referida.

Os resultados obtidos, relativos ao nível de risco em cada uma das áreas estudadas, mostram a existência de diferenças significativas (figura 42 e figura 46, capítulos 5.7.1 e 5.7.2). Como discutido no capítulo 5.7, foram estabelecidas classificações (tabela 33) com base nas probabilidades pós-teste, nomeadamente valores preditivos positivos (PPV) e taxa de falsas omissões (TFO), que dada a natureza pontual da metodologia adotada, representam, em ambos os casos, a percentagem de casas<sup>12</sup> acima do nível de referência. Dessa forma, e assumindo que os valores calculados representam estatisticamente cada uma das classes, é possível comparar os resultados relativos das duas regiões. A área com a percentagem mais elevada de casas acima do nível de referência na região de Tondela é estatisticamente semelhante à área com menor percentagem de casas acima do nível de referência da região de Oliveira do Hospital. Ambas as áreas possuem aproximadamente 55% das casas acima do nível de referência e foram classificadas como “APR – Probabilidade elevada”.

Quando a metodologia ROC seguida envolve um critério relacionado com a expectância de cada uma das áreas, as probabilidades pós-teste, nomeadamente da taxa de falsos omitidos (TFO) e do valor preditivo positivo (VPP), deixam de refletir uma propriedade do conjunto habitacional e passam a refletir uma propriedade do conjunto das áreas

---

<sup>12</sup> A percentagem de casas é apenas representativa das condições de aquisição dos dados. Como a amostragem foi direcionada para habitações onde existe maior relação com o radão disponível nos solos (rés-do-chão e primeiro andar), esta percentagem será maior do que a percentagem real em função de todas as casas da área (considerando também 2os, 3os, 4os, ..., com menores concentrações).

consideradas como unidades (por exemplo células de uma grelha). Isto porque, no caso de uma área considerada como positiva ou negativa (0 ou 1), a  $P(E[C_{Rn\ na\ habitação}] \geq 300\ Bq \cdot m^{-3}) \neq P(C_{Rn\ na\ habitação} \geq 300\ Bq \cdot m^{-3})$ . O primeiro caso remete para a percentagem de áreas cuja expectância é superior ao nível de referência, de todas as áreas com a mesma classificação atribuída. O segundo caso remete para a percentagem de casas com concentrações acima do nível de referência, de todas as casas consideradas numa classe. No caso de um mapa binário, são atribuídos os mesmos parâmetros estatísticos à área total de uma classe (conjunto de todas as áreas unitárias com a mesma classificação). Como se perde a individualidade da informação, nomeadamente de quais áreas representam a percentagem de áreas com expectância acima do nível de referência, do ponto de vista de análise dos mapas, é mais relevante saber, para essa classe, qual a percentagem de casas acima do nível de referência. Contudo, se o objetivo for a extrapolação da classificação para outras regiões, a utilização de medidas de expectância é mais robusta. A metodologia aqui apresentada é específica para o caso de estudo, pelo que extrapolar a classificação estabelecida numa região, para uma região não contigua, não tem qualquer tipo de suporte estatístico (por exemplo, aplicar a classificação de Oliveira do Hospital ao caso de Tondela). É inclusive essa a grande vantagem da metodologia da análise ROC, que permite, para cada área de estudo, estabelecer uma classificação com significado estatístico e não basear a classificação puramente em intervalos pré-estabelecidos, utilizados em contextos geologicamente diferentes. No caso de Oliveira do Hospital, os dados disponíveis de concentração de atividade de radão nas habitações, foram obtidos essencialmente na zona Sudeste. Só é válido extrapolar a classificação para Norte pois o contexto geológico mantém-se para Norte e o mapa interpolado representa uma superfície continua de valores.

Sabe-se que o cálculo da expectância possui maior incerteza quanto menor o número de amostras consideradas. Como tal, foi demonstrado que a amostragem reduzida afeta o sistema de classificação binária (Bossew, 2014). Mas em sentido inverso, com o aumento da amostragem mínima requerida, menos quadriculas estão disponíveis para o cálculo da curva ROC, o que a torna cada vez menos suave. Na metodologia adotada, uma amostragem reduzida também se refletirá no sistema de classificação. Pode implicar que não existam dados sobre concentração de atividade de  $^{222}Rn$  em habitações, em alguns intervalos de radiação  $\gamma$  total. No caso de Tondela verificou-se na análise ROC que para um intervalo de valores de radiação os parâmetros calculados eram invariáveis.

Outra questão que pode ser levantada é o impacto da aglomeração enviesada dos dados, em particular da concentração do radão no ar dependente da localização das habitações, tendencialmente em áreas geográficas muito restritas. No cálculo das

probabilidades pós-teste<sup>13</sup>, os enviesamentos poderiam ser problemáticos. Contudo, há a considerar duas situações, que contribuem para reduzir a incerteza nos resultados destes cálculos. O enviesamento associado à prevalência deve ser desconsiderado pelo facto de a prevalência ser uma característica inerente à própria área. Assumindo que existe uma distribuição espacial mínima e uma quantidade de dados mínima, que devolva resultados satisfatórios da análise ROC, então assegura-se que os dados, pela lei dos grandes números, refletem a prevalência natural da área. Pelo contrário, o impacto associado à aglomeração enviesada dos dados é expectável que tenha impacto nos resultados da análise. Para o caso da área de menor risco (o inverso é válido para a área de maior risco), se os dados estiverem aglomerados, por exemplo, numa área de radiação gama total mais baixa, pela correlação positiva entre as variáveis, é expectável que o limite ótimo da classificação diminua. Em relação a um limite estático, quer os falsos negativos (FN) quer os verdadeiros negativos (VN) tendem a aumentar, o que faz com que quer a TVP quer a TFP tendam a diminuir, deslocando-se para o canto inferior esquerdo do gráfico ROC. O enviesamento dos dados de radão nas habitações para áreas de radiação gama total mais baixa faz com que a análise ROC permita um melhor contraste das observações positivas e das observações negativas em limites mais baixos. O facto de a classificação mudar é a característica básica da análise ROC, uma vez que a metodologia, como já foi dito, não estabelece um limite fixo, mas sim relativo. Relativamente ao enviesamento dos dados, é ainda de acrescentar que a aglomeração dos dados é quase na totalidade das vezes um reflexo da densidade do complexo habitacional, pelo que direciona a classificação das áreas para que melhor reflita o estado atual de risco radiológico. Ainda assim, será sempre preferível possuir uma amostragem espacialmente balanceada. Este tipo de análises permite também tomar decisões, quanto à necessidade de direccionar fundos para o complemento da amostragem disponível para áreas específicas. É então uma metodologia versátil uma vez que fornece sempre resultados válidos, com informação relevante para cada uma das áreas classificadas. Esta classificação não é, portanto, estanque. É uma classificação aberta, que beneficia sempre do incremento de novos dados. Apesar de toda a argumentação teórica aqui expressa, ainda assim, não é dispensável uma avaliação futura destes impactos, num caso prático.

---

<sup>13</sup> Pós-teste é o termo utilizado para designar parâmetros estatísticos, calculados da tabela de contingência, que assumem a classificação proposta como verdadeira: é o caso por exemplo do valor preditivo positivo (VPP) e do valor preditivo negativo (VPN).

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

Os trabalhos desenvolvidos para esta dissertação permitiram obter conclusões importantes, em duas vertentes: relativamente ao cenário radiológico atual nas áreas de estudo e relativamente à aplicação de novas metodologias de avaliação do risco radiológico, em especial por inalação do gás radão e seus descendentes.

Existem evidências suficientes para assumir que as variações na radiação  $\gamma$  total são provocadas pelas variações espaciais associadas à cadeia de decaimento do U. O impacto da cadeia de decaimento do Th ou o impacto do  $^{40}\text{K}$  são negligenciáveis. Em conjunto, a relação espacial observada entre a distribuição das anomalias de radiação  $\gamma$  total e das anomalias de concentração de atividade de radão nos solos, validam a utilização da radiação  $\gamma$  total como variável *proxy* para a cartografia de áreas propensas ao gás radão no interior de habitações.

Devido à variabilidade natural dos dados de concentração de atividade de radão nos solos e ao espaçamento inter- e intra-perfis de aquisição, a criação de superfícies contínuas por interpolação de dados, a uma escala como as aqui apresentadas, não evidencia, de forma precisa, o controlo direcional das componentes estruturais. Essa associação é mais evidente na análise de perfis únicos unidirecionais, como apresentado em Pereira et al. (2010).

A metodologia de aquisição dos dados, nomeadamente de radiação  $\gamma$  total, tem impacto nos resultados da interpolação. Os resultados que melhor caracterizaram as áreas de estudo, tiveram como base dados de uma cartografia extensiva das anomalias. Contudo, a cartografia do fundo radiológico também é essencial para os métodos de interpolação, para limitar a extensão das anomalias.

A variabilidade dos dados de radiação  $\gamma$  total é condicionada às litologias aflorantes mas também pelas anomalias geoquímicas, expressas nas distribuições que, em função do fundo, são aproximadamente log-normais, mas que onde as anomalias impõem alterações ao padrão geral, em particular na cauda direita das mesmas distribuições. Estas anomalias são condicionadas pelas estruturas geológicas, falhas, mas também pelos encraves metassedimentares do Grupo das Beiras. Nos locais onde ocorrem os encraves, a anomalia tende a ocorrer no interior destes, mais disseminada, ainda que controlada pelas estruturas, e não nos granitos. Quando a anomalia ocorre em estruturas que apenas intersejam granitos, a anomalia é mais localizada. A principal família de falhas com anomalias orienta-se segundo aproximadamente N35°E, com as anomalias a ocorrerem preferencialmente na interceção com estruturas de outras orientações, nomeadamente N75°E e N55°E. Quando os dados apresentam anisotropia, esta condiz com as orientações mencionadas.

As duas áreas de estudo têm um potencial de radão elevado, com uma percentagem de casas<sup>14</sup> acima do nível de referência nacional ( $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) superior às percentagens tipicamente admitidas a nível europeu (10 ou 30 %), considerando-se um risco elevado para essas áreas. A região de Oliveira do Hospital apresenta um potencial de radão mais elevado do que Tondela. Das quatro áreas classificadas, a área de Tondela mais propensa a radão e a área de Oliveira do Hospital menos propensa a radão, apresentam probabilidades iguais de excedência do nível de referência. A área menos propensa a radão em Tondela, conforme o sistema adotado de classificação, função da percentagem de excedência admitida, pode ser interpretada como área propensa a radão (APR) ou área não propensa a radão (ANPR).

A metodologia de Bossew (2014) é mais robusta para extrapolação do sistema de classificação a áreas não contiguas, para as quais não existem dados de concentração de atividade de radão em habitações, com o objetivo de previsão do risco radiológico. A metodologia aqui proposta, que admite os dados na sua forma pontual e na sua localização espacial, associada a uma superfície contínua de valores interpolada, é mais robusta na avaliação da variabilidade espacial, para áreas de dimensão muito mais reduzidas (limites administrativos) do que a dimensão nacional. A pequena diferença no poder de classificação do sistema binário estabelecido, entre os dois trabalhos, é atribuída à diferença de correlação, que as variáveis *proxy* têm para com a variável de concentração de atividade de radão no interior das habitações. O potencial geogénico proposto em Neznal (2004) e considerado em Bossew (2014), possui maior correlação com o radão no interior das habitações do que a radiação  $\gamma$  total, aqui considerada. A análise da curva ROC é mais robusta do que a classificação de áreas com base em intervalos pré-estabelecidos, ou intervalos estatísticos básicos (quantis, intervalos geométricos, intervalos naturais, entre outros) da variável *proxy*, por considerar a relação entre falsos positivos e falsos negativos.

A análise da curva ROC é uma metodologia aberta, que se aproxima dos valores expectáveis reais com o aumento dos dados disponíveis. Para o futuro, a classificação aqui proposta pode ser melhorada com o aumento da amostragem e posterior reanálise da curva ROC. Na região de Tondela, parte da amostragem deve ser direcionada, se possível, para áreas com radiação  $\gamma$  total entre os 235 cps e os 305 cps. Na região de Oliveira do Hospital a amostragem deve ser direcionada para a zona Norte, bem como tentar amostrar áreas mais afastadas das anomalias, se possível. A interpolação dos dados de radiação  $\gamma$  total também melhora com o aumento dos pontos amostrados. Em Oliveira do Hospital é possível num trabalho futuro direcionar a amostragem para as áreas correspondentes ao fundo radiológico,

---

<sup>14</sup> A percentagem de casas é apenas representativa das condições de aquisição dos dados. Como a amostragem foi direcionada para habitações onde existe maior relação com o radão disponível nos solos (rés-do-chão e primeiro andar), esta percentagem será maior do que a percentagem real em função de todas as casas da área (considerando também 2os, 3os, 4os, ..., com menores concentrações).

para melhorar a extensão das anomalias e melhorar o condicionamento estrutural do fundo radiológico. A metodologia de aquisição de Salgado (2000) revelou ser muito adequada para a interpolação dos dados de radiação gama total num contexto geológico como o aqui apresentado, com um claro condicionamento estrutural de fortes anomalias radiológicas.

Dos resultados obtidos e da discussão dos mesmos, não só surgiram as oportunidades de melhoria das metodologias, supramencionadas, como também foram levantadas algumas questões pertinentes, com oportunidade de investigação futura.

Que seja do nosso conhecimento, não existem trabalhos que tenham dado seguimento às evidências de possível ocorrência de precipitação muito recente de urânio, pelo menos de idade quaternária, tal como indicado nos trabalhos de Neves et al. (1997). Igualmente não são do nosso conhecimento, a existência de estudos sobre as condições e mecanismos para a precipitação do U sob as condições de fluidos meteóricos atuais, nomeadamente a tendência para a ocorrência de anomalias na área de interseção do sistema de falhas NNE-SSW, com sistemas com outras orientações, ou contactos litológicos. Ou ainda, o sentido preferencial da remobilização do U, para o interior dos encraves metassedimentares, quando estes estão presentes. Algumas hipóteses/questões são colocadas:

- Os locais anómalos apresentam equilíbrio secular na cadeia de decaimento do U?
- Alinhamentos com diferentes orientações podem também apresentar fluidos circulantes com natureza química significativamente distinta, que, no seu contacto, a mistura de fluídos deixe o U (ou Ra) instável e leve à sua reprecipitação?
- Os fluidos meteóricos atuais continuam a contribuir para estas anomalias ou têm condições de as lixiviar? Existe alguma tendência direcional no controlo desse fenómeno ou é aleatório? São questões importantes para a proteção radiológica, associada ao consumo de águas.
- Existe, para além da diferenciação textural, alguma diferenciação geoquímica, entre os diferentes tipos de sedimentos que compõe o Complexo Xisto Grauváquico, que influencie a reprecipitação do U (ou Ra) preferencialmente em alguns encraves?

A extensão das anomalias de radiação  $\gamma$  total não coincide com a extensão das anomalias de concentração de atividade de radão nos solos, numa caixa de falha, muitas vezes concentrada quase exclusivamente no centro da mesma, outras com dispersão maior numa das direções, em função da vergência da estrutura. Não coincide também com a transição mais suave das zonas anómalas em relação ao fundo, das concentrações de atividade de radão nos solos. Seria importante investigar estas relações entre extensões, uma vez que em muitos trabalhos, nomeadamente quando as estruturas são consideradas “fatores

agravantes” nos diferentes mapeamentos de risco, a influência das estruturas é atribuída de forma igual até uma distância puramente arbitrária. Uma proposta para o futuro, a qual chegou a ser iniciada, é a análise de fotografias aéreas antigas, em concreto do voo da *United States Air Force* de 1958, que tendo em conta o contexto da zona centro de Portugal à época, com a agricultura como principal atividade, antes das grandes vagas de emigração e de êxodo para o litoral, pode ser uma ferramenta importante na identificação de áreas de maior e menor alteração.



## 8. REFERÊNCIAS

- AKERBLOM, G., 1994. GROUND RADON - MONITORING PROCEDURES IN SWEDEN. GEOSCIENTIST. 1994. VOL. 4, NO. 4.
- AMARAL, P. G. Q., GALEMBECK, T. M. B., BONOTTO, D. M. E ARTUR, A. C., 2012. URANIUM DISTRIBUTION AND RADON EXHALATION FROM BRAZILIAN DIMENSION STONES. APPLIED RADIATION AND ISOTOPES [ONLINE]. 2012. VOL. 70, NO. 4, P. 808–817. DOI 10.1016/J.APRADISO.2011.10.010. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.APRADISO.2011.10.010](http://dx.doi.org/10.1016/J.APRADISO.2011.10.010).
- APPLETON, J. D. E MILES, J. C. H., 2010. A STATISTICAL EVALUATION OF THE GEOGENIC CONTROLS ON INDOOR RADON CONCENTRATIONS AND RADON RISK. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2010. VOL. 101, NO. 10, P. 799–803. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2009.06.002. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2009.06.002](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2009.06.002).
- AZEVEDO, M. R. E AGUADO, B. V., 2006. ORIGEM E INSTALAÇÃO DE GRANITÓIDES VARISCOS NA ZONA CENTRO-IBÉRICA. GEOLOGIA DE PORTUGAL NO CONTEXTO DA IBÉRIA. 2006. NO. JANUARY 2006.
- BOSSEW, P., 2014. DETERMINATION OF RADON PRONE AREAS BY OPTIMIZED BINARY CLASSIFICATION. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2014. VOL. 129, P. 121–132. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2013.12.015. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2013.12.015](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2013.12.015).
- BOSSEW, P., 2015. ESTIMATION OF RADON PRONE AREAS THROUGH BINARY CLASSIFICATION, PART 2: RADON PRONE GEOLOGIES. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2015. VOL. 141, P. 44–50. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2014.11.020. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2014.11.020](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2014.11.020).
- BOSSEW, P., CINELLI, G., TOLLEFSEN, T. E DECORT, M., 2016. TOWARDS A MULTIVARIATE GEOGENIC RADON HAZARD INDEX [ONLINE]. 2016. PRAGUE, CZECH REPUBLIC 12-16 SEPTEMBER 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://REMON.JRC.EC.EUROPA.EU/ABOUT/ATLAS-OF-NATURAL-RADIATION/GEOGENIC-RADON/GEOGENIC-RADON](https://remon.jrc.ec.europa.eu/about/atlas-of-natural-radiation/geogenic-radon/geogenic-radon).
- BOSSEW, P., CINELLI, G., CIOTOLI, G., CROWLEY, Q. G., DE CORT, M., MEDINA, J. E., GRUBER, V., PETERMANN, E. E TOLLEFSEN, T., 2020. DEVELOPMENT OF A GEOGENIC RADON HAZARD INDEX. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH. 2020. VOL. 17, NO. 11. DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/IJERPH17114134](https://doi.org/10.3390/IJERPH17114134).
- BOSSEW, P., DUBOIS, G. E TOLLEFSEN, T., 2008. INVESTIGATIONS ON INDOOR RADON IN AUSTRIA, PART 2: GEOLOGICAL CLASSES AS CATEGORICAL EXTERNAL DRIFT FOR SPATIAL MODELLING OF THE RADON POTENTIAL. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. 2008. VOL. 99, NO. 1, P. 81–97. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2007.06.013.
- CARRINGTON DA COSTA, J., 1950. NOTÍCIA SOBRE UMA CARTA GEOLÓGICA DO BUÇACO DE NERY DELGADO. COMUNICAÇÕES DOS SERVIÇOS GEOLÓGICOS DE PORTUGAL. 1950.
- CHOPPIN, G. R., LILJENZIN, J. E RYDBERG, J., 2002. DETECTION AND MEASUREMENT TECHNIQUES. EM: RADIOCHEMISTRY AND NUCLEAR CHEMISTRY. 3A EDIÇÃO. P. 192–238. ISBN 978-0-7506-7463-8.
- CINELLI, G., DE CORT, M., TOLLEFSEN, T., ACHATZ, M., AJTIĆ, J., BALLABIO, C., BARNET, I.,

- BOCHICCHIO, F., BORELLI, P., BOSSEW, P., BRAGA, R., BRATTICH, E., BRIGANTI, A., CARPENTIERI, C., CASTELLANI, C., CASTELLUCCIO, M., CHIABERTO, E., CIOTOLI, G., COLETTI, C., CUCCHI, A., DARAKTCHIEVA, Z., DI CARLO, C., DE FRANCE, J., DEHANDSCHUTTER, B., DOMINGOS, F., DUDAR, T., ELIO, J., FALLETTI, P., FERREIRA, A., FINNE, I. E., FONTANA, C., FUENTE MERINO, I., GALLI, G., GARCIA-TALAVERA, M., GERMAN, O., GROSSI, C., GRUBER, V., GUTIERREZ-VILLANUEVA, J., HANSEN, M., HERNANDEZ CEBALLOS, M. A., HOFFMANN, M., HURST, S., IURLARO, G., IVANOVA, K., JOBBAGY, V., JONES, A., KOVALENKO, G., KOZAK, K., LAWLEY, R., LEHNÉ, R., LISTER, B., LONG, S., LUCCHETTI, C., MAGNONI, M., MATOLIN, M., MAZUR, J., MAZZOLI, C., MCLAUGHLIN, J., MOLLO, M., MOSTACCI, D., MUNDIGL, S., NESBOR, D., NEVES, L., NEZNAL, M., NIKOLOV, J., NILSSON, P., NOGAROTTO, A., ONISCHENKO, A., ORGIAZZI, A., PACHEROVÁ, P., PANAGOS, P., PEREIRA, A., PEREZ, M. R., POKALYUK, V., PRESSYANOV, D., QUINDÓS PONCELA, L. S., RINGER, W., ROSSI, F., SANGIORGI, M., SASSI, R., SIMIC, Z., SMEDLEY, P., SOCCIARELLI, S., SOLIGO, M., STOULOS, S., SZABO, K., TÄHT-KOK, K., TODOROVIĆ, N., TOLTON, R., TUCCIMEI, P., TURTIAINEN, T., TYE, A., UDOVICIC, V., VASILYEV, A., VENOSO, G., VERDELOCCO, S., VERKHOVTSEV, V., VOLTAGGIO, M., ZHUKOVA, O. E ZHUKOVSKY, M., 2019. EUROPEAN ATLAS OF NATURAL RADIATION. LUXEMBOURG: PUBLICATIONS OFFICE OF THE EUROPEAN UNION. ISBN 978-92-76-08258-3.
- CINELLI, G., TOLLEFSEN, T., BOSSEW, P., GRUBER, V., BOGUCARSKIS, K., DE FELICE, L. E DE CORT, M., 2019. DIGITAL VERSION OF THE EUROPEAN ATLAS OF NATURAL RADIATION. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2019. VOL. 196, NO. AUGUST 2017, P. 240–252. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2018.02.008. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2018.02.008](https://doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2018.02.008).
- CLARK, I., 2001. PRACTICAL GEOSTATISTICS.
- COSTA, M. R., PEREIRA, A. J., NEVES, L. J. E FERREIRA, A., 2017. POTENTIAL HUMAN HEALTH IMPACT OF GROUNDWATER IN NON-EXPLOITED URANIUM ORES: THE CASE OF HORTA DA VILARIÇA (NE PORTUGAL). JOURNAL OF GEOCHEMICAL EXPLORATION [ONLINE]. 2017. VOL. 183, P. 191–196. DOI 10.1016/J.GEXPLO.2017.03.010. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.GEXPLO.2017.03.010](https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2017.03.010).
- COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION (EU), 2013. COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM OF 5 DECEMBER 2013 LAYING DOWN BASIC SAFETY STANDARDS FOR PROTECTION AGAINST THE DANGERS ARISING FROM EXPOSURE TO IONISING RADIATION, AND REPEALING DIRECTIVES 89/618/EURATOM, 90/641/EURATOM, 96/29/EURATOM, 97/43/EURATOM A [ONLINE]. 2013. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://EUR-LEX.EUROPA.EU/ELI/DIR/2013/59/2014-01-17](https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/2014-01-17).
- CRESSIE, N., 1993. STATISTICS FOR SPATIAL DATA: REVISED EDITION. JOHN WILEY & SONS. ISBN 0-471-00255-0.
- CURRIERO, F. C., HOHN, M. E., LIEBHOLD, A. M. E LELE, S. R., 2002. A STATISTICAL EVALUATION OF NON-ERGODIC VARIOGRAM ESTIMATORS. ENVIRONMENTAL AND ECOLOGICAL STATISTICS. 2002. VOL. 9, NO. 1, P. 89–110. DOI 10.1023/A:1013771109591.

- DARBY, S., HILL, D., DEO, H., AUVINEN, A., MIGUEL BARROS-DIOS, J., BAYSSON, H., BOCHICCHIO, F., FALK, R., FARCHI, S., FIGUEIRAS, A., HAKAMA, M., HEID, I., HUNTER, N., KREIENBROCK, L., KREUZER, M., LAGARDE, F., MÄKELÄINEN, I., MUIRHEAD, C., OBERAIGNER, W., PERSHAGEN, G., RUOSTEENOJA, E., SCHAFFRATH ROSARIO, A., TIRMARCHE, M., TOMÁŠEK, L., WHITLEY, E., WICHMANN, H. E. E DOLL, R., 2006. RESIDENTIAL RADON AND LUNG CANCER - DETAILED RESULTS OF A COLLABORATIVE ANALYSIS OF INDIVIDUAL DATA ON 7148 PERSONS WITH LUNG CANCER AND 14 208 PERSONS WITHOUT LUNG CANCER FROM 13 EPIDEMIOLOGIC STUDIES IN EUROPE. SCANDINAVIAN JOURNAL OF WORK, ENVIRONMENT AND HEALTH. 2006. VOL. 32, P. 84.
- DECRETO-LEI N.O 108/2018 DA PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS, 2018. [ONLINE]. DIÁRIO DA REPÚBLICA N.O 232/2018, SÉRIE I DE 2018-12-03. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DRE.PT/APPLICATION/CONTEUDO/117202785](https://dre.pt/application/conteudo/117202785).
- DROLET, JEAN PHILIPPE, MARTEL, RICHARD, POULIN, PATRICK E DESSAU, JEAN CLAUDE, 2014. METHODOLOGY DEVELOPED TO MAKE THE QUEBEC INDOOR RADON POTENTIAL MAP. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT [ONLINE]. 2014. VOL. 473–474, P. 372–380. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2013.12.039. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.SCITOTENV.2013.12.039](http://dx.doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.12.039).
- DROLET, J. P., MARTEL, R., POULIN, P., DESSAU, J. C., LAVOIE, D., PARENT, M. E LÉVESQUE, B., 2013. AN APPROACH TO DEFINE POTENTIAL RADON EMISSION LEVEL MAPS USING INDOOR RADON CONCENTRATION MEASUREMENTS AND RADIOGEOCHEMICAL DATA POSITIVE PROPORTION RELATIONSHIPS. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2013. VOL. 124, P. 57–67. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2013.04.006. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2013.04.006](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2013.04.006).
- DUBOIS, G., BOSSEW, P., TOLLEFSEN, T. E DE CORT, M., 2010. FIRST STEPS TOWARDS A EUROPEAN ATLAS OF NATURAL RADIATION: STATUS OF THE EUROPEAN INDOOR RADON MAP. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2010. VOL. 101, NO. 10, P. 786–798. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2010.03.007. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2010.03.007](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2010.03.007).
- ESRI, 2019A. INTRODUCTION TO GEOSTATISTICAL ANALYST. [ONLINE]. 2019. [ACESSADO A 22/05/2020]. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DESKTOP.ARCGIS.COM/EN/ARCMAP/LATEST/EXTENSIONS/GEOSTATISTICAL-ANALYST/WHAT-IS-GEOSTATISTICS-.HTM](https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm).
- ESRI, 2019B. CROSS VALIDATION. [ONLINE]. 2019. [ACESSADO A 26/05/2020]. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DESKTOP.ARCGIS.COM/EN/ARCMAP/LATEST/TOOLS/GEOSTATISTICAL-ANALYST-TOOLBOX/CROSS-VALIDATION.HTM](https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/geostatistical-analyst-toolbox/cross-validation.htm).
- 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.
- FREEZE, R. A. E CHERRY, J. A., 1979. GROUNDWATER. ENGLEWOOD CLIFFS, NEW JERSEY: PRENTICE-HALL, INC. ISBN 0-13-365312-9.
- GARCÍA-TALAVERA, M., GARCÍA-PÉREZ, A., REY, C. E RAMOS, L., 2013. MAPPING RADON-PRONE AREAS USING  $\Gamma$ -RADIATION DOSE RATE AND GEOLOGICAL INFORMATION. JOURNAL OF RADIOLOGICAL

- PROTECTION. 2013. VOL. 33, NO. 3, P. 605–620. DOI 10.1088/0952-4746/33/3/605.
- GOMES, M. E. P., MARTINS, L. M. O., NEVES, L. J.P. F. E PEREIRA, A. J. C. S., 2013. NATURAL RADIATION AND GEOCHEMICAL DATA FOR ROCKS AND SOILS, IN THE NORTH INTERNATIONAL DOURO CLIFFS (NE PORTUGAL). JOURNAL OF GEOCHEMICAL EXPLORATION. 2013. VOL. 130, P. 60–64. DOI 10.1016/J.GEXPLO.2013.03.001.
- GRUBER, V., BOSSEW, P., DE CORT, M. E TOLLEFSEN, T., 2013. THE EUROPEAN MAP OF THE GEOGENIC RADON POTENTIAL. JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION. 2013. VOL. 33, NO. 1, P. 51–60. DOI 10.1088/0952-4746/33/1/51.
- GRUBER, V., BAUMANN, S., HIMMELBAUER, K., LAUBICHLER, C., ALBER, O., BOSSEW, P., PETERMANN, E., CIOTOLI, G., PEREIRA, A., DOMINGOS, F., TONDEUR, F., CINELLI, G., SAINZ, C., QUINDÓS-PORCELA, L. E GUTIERREZ-VILLANUEVA, J. L., [s.d.]. RADON MAPPING EXERCISE - ACTIVITY 4.4.2 OF 16ENV10 METRO RADON.
- HOLM, S., 1979. A SIMPLE SEQUENTIALLY REJECTIVE MULTIPLE TEST PROCEDURE. SCANDINAVIAN JOURNAL OF STATISTICS. 1979. VOL. 6, NO. 2, P. 65–70.
- IELSCH, G., CUNEY, M., BUSCAIL, F., ROSSI, F., LEON, A. E CUSHING, M. E., 2017. ESTIMATION AND MAPPING OF URANIUM CONTENT OF GEOLOGICAL UNITS IN FRANCE. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2017. VOL. 166, P. 210–219. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2016.05.022. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2016.05.022](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2016.05.022).
- IELSCH, G., CUSHING, M. E., COMBES, P. E CUNEY, M., 2010. MAPPING OF THE GEOGENIC RADON POTENTIAL IN FRANCE TO IMPROVE RADON RISK MANAGEMENT: METHODOLOGY AND FIRST APPLICATION TO REGION BOURGOGNE. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2010. VOL. 101, NO. 10, P. 813–820. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2010.04.006. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2010.04.006](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2010.04.006).
- INE, I. P., 2012. CENSOS 2011 RESULTADOS DEFINITIVOS - REGIÃO CENTRO. LISBOA.
- INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC), 1988. MAN-MADE MINERAL FIBRES AND RADON. 1988. LYON, FRANCE. ISBN 92 832 1243 6.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 2013. ADVANCES IN AIRBORNE AND GROUND GEOPHYSICAL METHODS FOR URANIUM EXPLORATION. VIENNA, AUSTRIA.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 2015. PROTECTION OF THE PUBLIC AGAINST EXPOSURE INDOORS DUE TO RADON AND OTHER NATURAL SOURCES OF RADIATION [ONLINE]. VIENNA, AUSTRIA: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ISBN 978–92–0–102514–2. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW-PUB.IAEA.ORG/MTCD/PUBLICATIONS/PDF/PUB1651WEB-62473672.PDF](http://www-pub.iaea.org/MTCD/PUBLICATIONS/PDF/PUB1651WEB-62473672.PDF).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), [s.d.]. LIVE CHART OF NUCLIDES. [ONLINE]. [ACESSADO A 12/09/2020]. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://NDS.IAEA.ORG/RELNSD/VCHARTHTML/VCHARTHTML.HTML](https://nds.iaea.org/RELNSD/VCHARTHTML/VCHARTHTML.HTML).
- ISAAKS, E. H. E SRIVASTAVA, R. M., 1989. AN INTRODUCTION TO APPLIED GEOSTATISTICS [ONLINE]. OXFORD UNIVERSITY PRESS. ISBN 9780195050134. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://BOOKS.GOOGLE.PT/BOOKS?ID=vC2DcXFLI3YC](https://books.google.pt/books?id=vC2DcXFLI3YC).
- KEMSKI, J., KLINGEL, R. E SIEHL, A., 1996. CLASSIFICATION AND MAPPING OF RADON-AFFECTED AREAS IN GERMANY. ENVIRONMENT INTERNATIONAL. 1996. VOL. 22, NO. SUPPL. 1.

- KEMSKI, J., KLINGEL, R., SIEHL, A. E VALDIVIA-MANCHEGO, M., 2009. FROM RADON HAZARD TO RISK PREDICTION-BASED ON GEOLOGICAL MAPS, SOIL GAS AND INDOOR MEASUREMENTS IN GERMANY. ENVIRONMENTAL GEOLOGY. 2009. VOL. 56, NO. 7, P. 1269–1279. DOI 10.1007/s00254-008-1226-Z.
- KEMSKI, J., SIEHL, A., STEGEMANN, R. E VALDIVIA-MANCHEGO, M., 2001. MAPPING THE GEOGENIC RADON POTENTIAL IN GERMANY. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT. 2001. VOL. 272, NO. 1–3, P. 217–230. DOI 10.1016/S0048-9697(01)00696-9.
- LAMAS, R., MIRANDA, M. M., PEREIRA, A. J. S. C., FERREIRA, N. E NEVES, L. J. P. F., 2015. DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS RADIOGÉNICOS NAS ROCHAS GRANITÓIDES AFLORANTES NA ZONA CENTRO IBÉRICA (CENTRO E NORTE DE PORTUGAL).
- LAMAS, R., MIRANDA, M. M., PEREIRA, A. J. S. C., NEVES, L. J. P. F., FERREIRA, N. E RODRIGUES, N. V., 2017. 3-D DISTRIBUTION OF THE RADIOELEMENTS IN THE GRANITIC ROCKS OF NORTHERN AND CENTRAL PORTUGAL AND GEOTHERMAL IMPLICATIONS. JOURNAL OF IBERIAN GEOLOGY. 2017. VOL. 43, NO. 1, P. 3–12. DOI 10.1007/s41513-017-0001-Y.
- LANDIM, P. M. B., 2006. SOBRE GEOESTATÍSTICA E MAPAS. TERRAE DIDACTICA. 2006. VOL. 2, NO. 1, P. 19–33. DOI 10.20396/TD.V2I1.8637463.
- MATTHEWS, B. W., 1975. COMPARISON OF THE PREDICTED AND OBSERVED SECONDARY STRUCTURE OF T4 PHAGE LYSOZYME. BIOCHIMICA ET BIOPHYSICA ACTA - PROTEIN STRUCTURE. 1975. VOL. 405, NO. 2, P. 442–451. DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/0005-2795\(75\)90109-9](https://doi.org/10.1016/0005-2795(75)90109-9).
- MEIRELES, C., CASTRO, P. E FERREIRA, N., 2014. EVIDÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, LITOESTRATIGRÁFICAS E ESTRUTURAS SOBRE A PRESENÇA DE DISCORDÂNCIA CADOMIANA INTRA GRUPO DAS BEIRAS. COMUNICAÇÕES GEOLÓGICAS. 2014. VOL. 101, NO. ESPEC. I, P. 495–498.
- MIKLYAEV, P. S., PETROVA, T. B., MARENYY, A. M., SHCHITOV, D. V., SIDYAKIN, P. A., MURZABEKOV, M. E LOPATIN, M. N., 2020. HIGH SEASONAL VARIATIONS OF THE RADON EXHALATION FROM SOIL SURFACE IN THE FAULT ZONES (BAIKAL AND NORTH CAUCASUS REGIONS). JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2020. VOL. 219, NO. APRIL 2019, P. 106-271. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2020.106271. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2020.106271](https://doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2020.106271).
- MILES, J. C. H. E APPLETON, J. D., 2005. MAPPING VARIATION IN RADON POTENTIAL BOTH BETWEEN AND WITHIN GEOLOGICAL UNITS. JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION. 2005. VOL. 25, NO. 3, P. 257–276. DOI 10.1088/0952-4746/25/3/003.
- MIRANDA, M. M., LAMAS, R., PEREIRA, A. J. S. C., FERREIRA, N. E NEVES, L. J. P. F., 2015. POTENCIAL TÉRMICO DAS ROCHAS GRANITÓIDES AFLORANTES NA ZONA CENTRO-IBÉRICA (PORTUGAL) HEAT PRODUCTION OF THE GRANITIC ROCKS OUTCROPPING IN THE CENTRAL IBERIAN ZONE (PORTUGAL). ESPECIAL I [ONLINE]. 2015. VOL. 102, NO. JULY 2017, P. 133–136. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.LNEG.PT/IEDT/UNIDADES/16/PAGINAS/26/30/208](http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/208).
- MORSE, R. H., 1976. RADON COUNTERS IN URANIUM EXPLORATION. EM: SYMPOSIUM ON EXPLORATION OF URANIUM ORE DEPOSITS. VIENNA, AUSTRIA: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 1976.
- NEIVA, J. M. C. E DIAS, J. M. M., 2010. MINERALIZAÇÃO E GÉNESE DOS JAZIGOS PORTUGUESES DE MINÉRIOS DE URÂNIO. EM: CIÊNCIAS GEOLÓGICAS: ENSINO, INVESTIGAÇÃO E SUA HISTÓRIA. P. 109–119. ISBN

- 978-989-96669-1-7.
- NERO, A. V., GADGIL, A. J., NAZAROFF, W. W. E REVZAN, K. J., 1990. INDOOR RADON AND ITS DECAY PRODUCTS: CONCENTRATIONS, CAUSES, AND CONTROL STRATEGIES.
- NEVES, L. J. P. F., GODINHO, M. M. E PEREIRA, A. J. S. C., 2010. GEOLOGIA DO RADÃO NA REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL - UMA SÍNTESE BREVE. EM: CIÊNCIAS GEOLÓGICAS: ENSINO, INVESTIGAÇÃO E SUA HISTÓRIA. P. 249–258. ISBN 978-989-96669-1-7.
- NEVES, L. J. P. F., PEREIRA, A. J. S. C., CARTER, A., GODINHO, M. M., DIAS, J. M. M. E HURFORD, A. J., 1997. EVIDÊNCIAS DE MOBILIZAÇÃO RECENTE DO URÂNIO NUM GRANITO DE TORREDEITA (VISEU): UM ESTUDO POR TRAÇOS DE FISSÃO. EM: X SEMANA DE GEOQUÍMICA E IV CONGRESSO DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA. BRAGA. 1997. P. 401–403.
- NEVES, L. J. P. F., PEREIRA, A. J. S. C., GODINHO, M. M. E DIAS, J. M. MATOS, 1996. A RADIOACTIVIDADE DAS ROCHAS COMO UM FACTOR DE RISCO AMBIENTAL NO TERRITÓRIO CONTINENTAL PORTUGUÊS: UMA SÍNTESE. EM: V CONFERÊNCIA NACIONAL SOBRE A QUALIDADE DO AMBIENTE. 1996.
- NEZNAL, M., NEZNAL, M., MATOLÍN, M., BARNET, I. E MIKSOVA, J., 2004. THE NEW METHOD FOR ASSESSING THE RADON RISK OF BUILDING SITES. CZECH GEOL. SURVEY SPECIAL PAPERS [ONLINE]. 2004. NO. 16, P. 47. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.RADON-VOS.CZ/PDF/METODIKA.PDF](http://www.radon-vos.cz/pdf/metodika.pdf).
- PEREIRA, A. J. S. C., 1991. TRANSFERÊNCIAS DE CALOR E ASCENSÃO CRUSTAL NO SEGMENTO TONDELA-OLIVEIRA DO HOSPITAL (PORTUGAL CENTRAL) APÓS A IMPLANTAÇÃO DOS GRANITOS HERCÍNICOS SIN A TARDI-OROGÉNICOS. UNIVERSIDADE DE COIMBRA.
- PEREIRA, A. J. S. C., GODINHO, M. M. E NEVES, L. J. P. F., 2010. ON THE INFLUENCE OF FAULTING ON SMALL-SCALE SOIL-GAS RADON VARIABILITY: A CASE STUDY IN THE IBERIAN URANIUM PROVINCE. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2010. VOL. 101, NO. 10, P. 875–882. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2010.05.014. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2010.05.014](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2010.05.014).
- PEREIRA, A. J. S. C. E NEVES, L. J. P. F., 2012. ESTIMATION OF THE RADIOLOGICAL BACKGROUND AND DOSE ASSESSMENT IN AREAS WITH NATURALLY OCCURRING URANIUM GEOCHEMICAL ANOMALIES-A CASE STUDY IN THE IBERIAN MASSIF (CENTRAL PORTUGAL). JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2012. VOL. 112, P. 96–107. DOI 10.1016/J.JENVRAD.2012.05.022. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2012.05.022](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2012.05.022).
- PEREIRA, A. J. S. C., NEVES, L. J. P. F. E ABRANTES, L. M. C. B. L., 2003. O GÁS RADÃO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: O CASO DA REGIÃO DE OLIVEIRA DO HOSPITAL (PORTUGAL CENTRAL). IV CONGRESSO IBÉRICO DE GEOQUÍMICA E XIII SEMANA DA GEOQUÍMICA IBÉRICO DE GEOQUÍMICA E XIII SEMANA DE GEOQUÍMICA. 2003.
- PEREIRA, A. J. S. C., NEVES, L. J. P. F., GODINHO, M. M. E DIAS, J. M. M., 2002. A RADIOACTIVIDADE NATURAL EM PORTUGAL: FACTORES GEOLÓGICOS CONDICIONANTES E IMPLICAÇÕES PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO. 2002.
- PEREIRA, A., LAMAS, R., MIRANDA, M., DOMINGOS, F., NEVES, L., FERREIRA, N. E COSTA, L., 2017. ESTIMATION OF THE RADON PRODUCTION RATE IN GRANITE ROCKS AND EVALUATION OF THE IMPLICATIONS FOR GEOGENIC RADON POTENTIAL MAPS: A CASE STUDY IN CENTRAL PORTUGAL. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY [ONLINE]. 2017. VOL. 166, P. 270–277. DOI

- 10.1016/J.JENVRAD.2016.08.022. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JENVRAD.2016.08.022](http://dx.doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2016.08.022).
- PEREIRA, M. F., LINNEMANN, U., HOFMANN, M., CHICHORRO, M., SOLÁ, A. R., MEDINA, J. E SILVA, J. B., 2012. THE PROVENANCE OF LATE EDIACARAN AND EARLY ORDOVICIAN SILICICLASTIC ROCKS IN THE SOUTHWEST CENTRAL IBERIAN ZONE: CONSTRAINTS FROM DETRITAL ZIRCON DATA ON NORTHERN GONDWANA MARGIN EVOLUTION DURING THE LATE NEOPROTEROZOIC. *PRECAMBRIAN RESEARCH* [ONLINE]. 2012. VOL. 192–195, NO. 1, P. 166–189. DOI 10.1016/J.PRECAMRES.2011.10.019. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.PRECAMRES.2011.10.019](http://dx.doi.org/10.1016/J.PRECAMRES.2011.10.019).
- PEREIRA, M. F., 2015. POTENTIAL SOURCES OF EDIACARAN STRATA OF IBERIA: A REVIEW. *GEODINAMICA ACTA* [ONLINE]. 2015. VOL. 27, NO. 1, P. 1–14. DOI 10.1080/09853111.2014.957505. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1080/09853111.2014.957505](http://dx.doi.org/10.1080/09853111.2014.957505).
- R CORE TEAM, 2019. R: A LANGUAGE AND ENVIRONMENT FOR STATISTICAL COMPUTING [ONLINE]. 2019. VIENNA, AUSTRIA: R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.R-PROJECT.ORG/](https://www.r-project.org/).
- ŘEŘIČHA, V., KULICH, M., ŘEŘIČHA, R., SHORE, D. L. E SANDLER, D. P., 2006. INCIDENCE OF LEUKEMIA, LYMPHOMA, AND MULTIPLE MYELOMA IN CZECH URANIUM MINERS: A CASE-COHORT STUDY. *ENVIRONMENTAL HEALTH PERSPECTIVES*. 2006. VOL. 114, NO. 6, P. 818–822. DOI 10.1289/EHP.8476.
- RSTUDIO TEAM, 2019. RSTUDIO: INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT FOR R [ONLINE]. 2019. BOSTON, MA. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.RSTUDIO.COM/](http://www.rstudio.com/).
- SAKODA, A., ISHIMORI, Y. E YAMAOKA, K., 2011. A COMPREHENSIVE REVIEW OF RADON EMANATION MEASUREMENTS FOR MINERAL, ROCK, SOIL, MILL TAILING AND FLY ASH. *APPLIED RADIATION AND ISOTOPES* [ONLINE]. 2011. VOL. 69, NO. 10, P. 1422–1435. DOI 10.1016/J.APRADISO.2011.06.009. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.APRADISO.2011.06.009](http://dx.doi.org/10.1016/J.APRADISO.2011.06.009).
- SALGADO, A. L. V., 2000. O POTENCIAL DE RADÃO NA REGIÃO DE TONDELA (PORTUGAL CENTRAL) - IMPLICAÇÕES PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO. UNIVERSIDADE DE COIMBRA.
- SALGADO, A. L. V., PEREIRA, A. J. S. C., NEVES, L. J. P. F. E GODINHO, M. M., 1998. DISTRIBUIÇÃO DE U E TH EM ROCHAS DA REGIÃO DE TONDELA (PORTUGAL CENTRAL). EM: V CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA. LISBOA. 1998.
- SILVA, A. F., ROMÃO, J. M. C., SEQUEIRA, A. J. D. E OLIVEIRA, J. T., 1988. GEOTRANSVERSAL NO GRUPO DAS BEIRAS (COMPLEXO XISTO-GRAUVÁQUICO) ENTRE OS SINCLINÓRIOS DE MAÇÃO E PENHA GARCIA (CENTRO-LESTE DE PORTUGAL). 1988. BRAGANÇA.
- SILVA, A. F., ROMÃO, J. M. C., SEQUEIRA, A. J. D. E OLIVEIRA, J. T., 1995. A SUCESSÃO LITOSTRATIGRÁFICA ANTÉ-ORDOVÍCICA NA ZONA CENTRO-IBÉRICA (ZCI), EM PORTUGAL: ENSAIO DE INTERPRETAÇÃO COM BASE NOS DADOS ACTUAIS. EM: XIII REUNIÓN DE GEOLOGIA DEL OESTE PENINSULAR. UNIV. SALAMANCA, SALAMANCA. 1995. P. 71–72.
- SILVA, A. F., 2005. A LITOSTRATIGRAFIA E ESTRUTURA DO SUPERGRUPO DÚRICO-BEIRÃO (COMPLEXO XISTO-GRAUVÁQUICO), EM PORTUGAL, E SUA CORRELAÇÃO COM AS CORRESPONDENTES SUCESSÕES EM ESPANHA. *GCG - WORKING PAPERS* [ONLINE]. 2005. P. 32. DISPONÍVEL EM: [HTTP://HDL.HANDLE.NET/10400.9/2616](http://hdl.handle.net/10400.9/2616).

- SILVA, M. M. V. G., 1995. MINERALOGIA, PETROLOGIA E GEOQUÍMICA DE ENCRAVES DE ROCHAS GRANÍTICAS DE ALGUMAS REGIÕES PORTUGUESAS. UNIVERSIDADE DE COIMBRA.
- SOUSA, M. B., 1982. LITOSTRATIGRAFIA E ESTRUTURA DO COMPLEXO XISTO-GRAUVÁQUICO ANTÉ-ORDOVÍCICO – GRUPO DO DOURO (NORDESTE DE PORTUGAL). 1982. COIMBRA: UNIVERSIDADE DE COIMBRA.
- SOUSA, M. B. E SEQUEIRA, A. J. D., 1989. NOTÍCIA EXPLICATIVA DA FOLHA 10-D (ALIJO). LISBOA: SERVIÇOS GEOLÓGICOS DE PORTUGAL.
- SRIVASTAVA, R. M. E PARKER, H. M., 1989. ROBUST MEASURES OF SPATIAL CONTINUITY. EM: GEOSTATISTICS. DORDRECHT: SPRINGER NETHERLANDS. 1989. P. 295–308. ISBN 978-94-015-6844-9.
- SYNNOTT, H. E FENTON, D., 2005. AN EVALUATION OF RADON MAPPING TECHNIQUES IN EUROPE.
- TAYLOR, S. R. E MCCLENNAN, S. M., 1985. THE CONTINENTAL CRUST : ITS COMPOSITION AND EVOLUTION. OXFORD: BLACKWELL SCIENTIFIC. ISBN 0632011483.
- TEIXEIRA, C., 1955. NOTAS SOBRE A GEOLOGIA DE PORTUGAL: O COMPLEXO XISTO-GRAUVÁQUICO ANTE-ORDOVICIANO. LISBOA: EMPRESA LITERÁRIA FLUMINENSE.
- TEIXEIRA, C., BRITO DE CARVALHO, L. H., BARROS, R. F., ÁVILA MARTINS, J. E HAAS, W. E. L., 1961. NOTÍCIA EXPLICATIVA DA FOLHA 17-C (SANTA COMBA DÃO). 1961. LISBOA: SERVIÇOS GEOLÓGICOS DE PORTUGAL.
- THARWAT, A., 2020. CLASSIFICATION ASSESSMENT METHODS. APPLIED COMPUTING AND INFORMATICS. 2020. DOI 10.1016/J.ACI.2018.08.003.
- TOLLEFSEN, T. E CINELLI, G., 2016. PROGRESS ON EUROPEAN GEOGENIC RADON MAPPING. 2016. PRAGUE, CZECH REPUBLIC 12-16 SEPTEMBER 2016.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR), 2008. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION.
- VARLEY, N. R. E FLOWERS, A.G., 1993. RADON IN SOIL GAS AND ITS RELATIONSHIP WITH SOME MAJOR FAULTS OF SW ENGLAND. ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY AND HEALTH. 1993. VOL. 15, P. 145–151. DOI 10.1007/BF02627832.
- WASSERSTEIN, R. L. E LAZAR, N. A., 2016. THE ASA'S STATEMENT ON P-VALUES: CONTEXT, PROCESS, AND PURPOSE. AMERICAN STATISTICIAN [ONLINE]. 2016. VOL. 70, NO. 2, P. 129–133. DOI 10.1080/00031305.2016.1154108. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1080/00031305.2016.1154108](http://dx.doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108).
- WICKHAM, H., AVERICK, M., BRYAN, J., CHANG, W., MCGOWAN, L. D., FRANÇOIS, R., GROLEMUND, G., HAYES, A., HENRY, L., HESTER, J., KUHN, M., PEDERSEN, T. L., MILLER, E., BACHE, S. M., MÜLLER, K., OOMS, J., ROBINSON, D., SEIDEL, D. P., SPINU, V., TAKAHASHI, K., VAUGHAN, D., WILKE, C., WOO, K. E YUTANI, H., 2019. WELCOME TO THE {TIDYVERSE}. JOURNAL OF OPEN SOURCE SOFTWARE. 2019. VOL. 4, NO. 43, P. 1686. DOI 10.21105/joss.01686.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), 2009. WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON: A PUBLIC HEALTH PERSPECTIVE. ISBN 978 92 4 154767 3.



