

**O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua
Prevenção e Mitigação**
revisão bibliográfica

Carla Filipa Costa e Cunha

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Medicina

(Mestrado Integrado)

Orientadora: Professora Doutora Sofia Ravara

setembro de 2023

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

Declaração de Integridade

Eu, Carla Filipa Costa e Cunha, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 27181 de Medicina da Faculdade das Ciências da Saúde, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 04 / 09 / 2023



(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

Dedicatória

Aos meus pais por nunca me deixarem desistir, por serem o meu maior exemplo de força e resiliência. Esta conquista é tanto minha como vossa, sem vocês jamais seria possível!

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Doutora Sofia Ravara, por toda a sua disponibilidade, compreensão, ajuda e partilha de conhecimento ao longo da elaboração desta dissertação.

Ao Professor Doutor Miguel Castelo Branco por toda a sua disponibilidade, dedicação e amabilidade para com os alunos. Aos docentes da Faculdade de Ciências da Saúde pela sua dedicação e empenho na nossa aprendizagem.

À minha Mãe por ser uma eterna lutadora, por estar sempre lá quando mais precisei, com todo o seu amor e apoio incondicional. Ao meu Pai por ser o meu maior exemplo de compreensão e amor incondicional, por me guiar sempre no caminho mais correto. Obrigada por serem o meu maior suporte ao longo desta caminhada, sem vocês nada seria possível.

Aos meus avôs por todo o incentivo e amor que sempre me deram, que mesmo sem saberem, foi crucial para chegar até aqui.

À minha Madrinha pelo seu apoio e amor incondicional, que nunca me deixaram desistir.

À minha Tia por sempre me ter impulsionado a correr atrás deste sonho.

A toda a minha família por todo o carinho, apoio e união que sempre me transmitiram.

Ao Henrique por todo apoio e amor incondicional, por nunca deixar de acreditar em mim e me ajudar a chegar até aqui.

À Djéssica, a irmã que a Covilhã me deu, por toda a ajuda, amor e compreensão ao longo destes anos, por estar lá sempre quando precisei e me ajudar a chegar até aqui.

Às minhas meninas por toda a cumplicidade, amor, apoio e compreensão demonstrados ao longo desta difícil caminhada.

Às minhas amigas/os e colegas que me acompanharam ao longo desta caminhada, tornando estes anos mais bonitos.

Às minhas estrelinhas que sempre me ampararam nos piores momentos e que eu sei que estiveram sempre lá para não me deixarem desistir.

À Covilhã, por se ter tornado a minha casa ao longo destes anos, a cidade neve que me acolheu de “braços abertos” e me proporcionou memórias inesquecíveis que levarei para sempre comigo.

A Lamoso que estará para sempre no meu coração, em todas as minhas conquistas.

Resumo

Introdução: O radão é um gás presente na atmosfera, sendo a principal fonte de radiação natural a que estamos expostos. Inicialmente, foi descoberto que a exposição laboral ao radão seria a principal causa de morte em mineiros europeus, dado que em ambientes pouco ventilados este elemento pode atingir concentrações mais elevadas e nocivas para a saúde humana. Foram então efetuados estudos sobre como as concentrações deste elemento em ambientes residenciais poderiam afetar a saúde das populações. O aumento da concentração de radão na atmosfera residencial está associado a um aumento da incidência de neoplasia pulmonar, sendo este o segundo fator de risco com maior impacto para esta patologia depois do tabagismo. Existe um efeito sinérgico entre estes dois fatores de risco, dado que a sua sobreposição eleva o risco em 20 a 25%.

Objetivo: Nesta dissertação, serão relacionados os efeitos da exposição ao radão com o risco de doença, com o objetivo de uma melhor compreensão do seu impacto na saúde humana. Assim, serão abordados os diferentes aspetos do seu sinergismo com o tabaco e outros carcinogénicos, bem como a sua associação com outras patologias não neoplásicas. Serão ainda enfatizadas as principais medidas de prevenção e de mitigação.

Metodologia: Realizou-se uma pesquisa bibliográfica temática e uma recolha de artigos na base de dados online PubMed. Esta foi feita através da combinação de várias palavras-chaves nomeadamente: “*radon exposure and health*”, “*effects and radon*”, “*radon and radiation*”, “*radon and prevention*”, “*radon and lung cancer*”, “*knowledge and radon*”, sendo complementada com uma pesquisa no portal da Organização Mundial de Saúde e da Agência Portuguesa do Ambiente (apambiente.pt). Desta pesquisa resultaram 68 artigos, dos quais 8 foram excluídos pela leitura do título e do resumo, por não se enquadrarem no tema abordado, resultando assim 60 artigos, sendo que destes 6 foram excluídos após leitura do artigo na íntegra por não se enquadrarem no tema ou não possuírem informação relevante para a elaboração deste trabalho. Para tal foram usados os seguintes critérios de inclusão: publicações feitas nos últimos 10 anos e idiomas português, espanhol e inglês.

Conclusão: O radão é um problema de saúde pública de extrema importância para a população, pelo que se torna imperativo aumentar o conhecimento público sobre a exposição a este gás e os efeitos que desta advêm para a saúde humana. Deste modo, é necessário um investimento significativo na sua prevenção/mitigação, uma vez que este é muito limitado. Como tal, é crucial a sensibilização e educação da população para este importante problema de saúde pública, além da promoção de investigação epidemiológica sobre o radão em Portugal.

Palavras-chave

Radão; Neoplasia pulmonar; Conhecimento da população; Saúde pública; Cancro; Medidas de prevenção e mitigação.

Abstract

Introduction: Radon is a common gas present in the atmosphere, being the main source of natural radiation to which we are exposed. Initially, it was discovered that occupational exposure to radon was the main cause of death in European miners, given that in poorly ventilated environments this element can reach higher concentrations and harmful to human health. Studies were then based on how the concentrations of this element in residential environments could affect the health of populations. The increase in the concentration of radon in the residential atmosphere is associated with an increased incidence of lung cancer, which is the second risk factor with the greatest impact for this pathology after smoking. There is a synergistic effect between these two risk factors, as their overlap increases the risk by 20 to 25%.

Objective: In this dissertation, the effects of radon exposure will be related to the risk of disease, with the aim of a better understanding of its impact on human health. Thus, the different aspects of its synergism with tobacco and other carcinogens will be addressed, as well as its association with other non-neoplastic pathologies. The main prevention and mitigation measures will also be emphasized.

Methodology: A thematic bibliographic search and a collection of articles were carried out in the online database PubMed. This was done by combining several keywords namely: *“radon exposure and health”, “effects and radon”, “radon and radiation”, “radon and prevention”, “radon and lung cancer”, “knowledge and radon”*, being complemented with a search on the portal of the World Health Organization and the Portuguese Environment Agency (apambiente.pt). This research resulted in 68 articles, of which 8 were excluded by reading the title and abstract, because they did not fit the theme addressed, thus resulting in 60 articles, of which 6 were excluded after reading the article in full because they did not fit the theme or did not have relevant information for the elaboration of this work. The following inclusion criteria were used: publications made in the last 10 years and languages Portuguese, Spanish and English.

Conclusion: Radon is a public health problem of extreme importance in the population, so it is imperative to increase public knowledge about exposure and health effects and their prevention/mitigation, because this is very limited. As such, it is crucial to raise awareness and educate the population about this important public health problem, in addition to promoting epidemiological research on radon in Portugal.

Keywords

Radon, Lung cancer; Knowledge of the population; Public health; Cancer; Prevention and mitigation measures.

Índice

Dedicatória.....	v
Agradecimento.....	vii
Resumo.....	ix
Abstract.....	xii
Lista de Figuras.....	xvi
Lista de Acrónimos.....	xviii
1. Introdução.....	1
2. Objetivo.....	2
3. Materiais e Métodos.....	3
5. Áreas de maior concentração atmosférica.....	5
6. Acumulação em edifícios.....	9
7. Ciclo de degradação e atingimento do organismo.....	12
8. Carcinogénese.....	12
8.1 Ação do radão sobre o epitélio pulmonar.....	12
8.2 Sinergismo com o tabaco e outros carcinogénicos.....	14
8.3 Associação com a neoplasia pulmonar.....	14
9. Primeiros estudos.....	16
10. Extrapolação de estudos dos mineiros para a população geral.....	16
10.1. Fumadores.....	17
10.2. Não-fumadores.....	18
11. Associação com neoplasias não pulmonares.....	20
12. Associação com outras patologias não neoplásicas.....	22
13. Conhecimento da população.....	23
14. Implementação de medidas de prevenção e de mitigação.....	25
15. Conclusão.....	29
16. Referências bibliográficas.....	31

Lista de Figuras

Figura 1- Fluxograma da seleção dos artigos	3
Figura 2- Percentagem da dose anual recebida pela população mundial.	4
Figura 3- Exemplo das variações sazonais das concentrações de radão.	5
Figura 4- Mapa de suscetibilidade ao radão	8
Figura 5- Mapa europeu do radão interior da Comissão Europeia.	8
Figura 6- Esquema das vias de entrada do radão para o interior de edifícios.	10
Figura 7- <i>Radon-described mechanisms of carcinogenesis in lung cancer</i>	13
Figura 8- Exemplos de medidas ativas para redução da concentração de radão no interior de edifícios.	28
Figura 9- Exemplos de medidas passivas para redução da concentração de radão no interior de edifícios.	29

Lista de Acrónimos

ADN	Ácido desoxirribonucleico
BEIR	<i>Biologic Effects of Ionizing Radiations</i>
Bq	Bequerel
DALYs	<i>Disability-adjusted life years</i>
DPOC	Doença pulmonar obstrutiva crónica
EBD	<i>Environmental burden of disease</i>
EGFR	Recetor do fator de crescimento epidérmico
EURATOM	Comunidade Europeia da Energia Atómica
EUA	Estados Unidos da América
FCS	Faculdade de ciências da saúde
GRHI	<i>Geogenic radon hazard index</i>
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
LDL	<i>Low Density Lipoproteins</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
PUMA	<i>Pooled Uranium Miner Analysis</i>
Rn	Radão
SI	Sistema Internacional de Unidades
SNC	Sistema Nervoso Central
UBI	Universidade da Beira Interior
UE	União europeia
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

1. Introdução

O radão é um gás radioativo natural que se forma como produto da decomposição do urânio e do tório, normalmente encontrados no solo e nas rochas. A radioatividade do solo depende dos processos de transporte durante a sua formação, o tipo e a espessura da cobertura do solo, a porosidade, a densidade, a humidade e a temperatura. Estando naturalmente presente na atmosfera, o radão emana e entra nos edifícios através da canalização ou através dos materiais de construção sendo que o solo é a sua fonte mais significativa. (1,2)

O radão entra no corpo humano através da sua inalação ou deglutição. A grande maioria do radão inalado é expulso das vias aéreas pela expiração, no entanto, há sempre uma pequena quantidade de partículas que permanece no pulmão e que, no decorrer do processo de decaimento normal, liberta partículas alfa que irão induzir dano nos tecidos. De facto, as partículas alfa têm um pequeno alcance e são geralmente bloqueadas pela barreira cutânea, só conseguindo atingir as células se já dentro do corpo, nomeadamente pela inalação das mesmas, onde ionizam e danificam as cadeias de ADN do parênquima pulmonar.(3)

O radão foi classificado como um agente carcinogénico pela Organização Mundial de Saúde (OMS) em 1986 e pela Agência Internacional de Investigação Oncológica em 1988. A exposição a este gás é considerada, pela OMS, como o fator de risco mais importante para o cancro do pulmão em não fumadores e o segundo fator de risco mais relevante para o cancro do pulmão em fumadores, sendo o primeiro o tabagismo. Verifica-se que mesmo com baixas doses de exposição, o risco de neoplasia pulmonar aumenta. (4–6)

Por conseguinte, é importante o desenvolvimento de medidas de prevenção para a redução da concentração do radão presente no interior dos edifícios, sendo esta uma das 12 recomendações do *European Code Against Cancer*. A OMS recomenda concentrações de radão abaixo dos 100 Bq/m³. De forma a reduzir a morbimortalidade associada ao radão, é fundamental que existam políticas públicas que previnam e reduzam a exposição a este carcinogéneo, identificando as populações que estão em maior risco, tanto nas suas habitações como por exposição laboral, que sejam desenhados programas de rastreio para estas populações, e ainda implementadas medidas de prevenção e de mitigação. (5,7)

2. Objetivo

O **objetivo geral** desta dissertação é avaliar os efeitos da exposição ao radão na saúde humana, caracterizando as fontes e condições da exposição, as populações mais afetadas e o risco de doença e mortalidade. Deste modo, poderão ser planeadas medidas de prevenção e de mitigação, que permitam reduzir o impacto negativo da exposição ao radão na saúde pública.

No que diz respeito aos **objetivos específicos**, é necessário avaliar e entender: as características do radão enquanto gás radioativo, quais as fontes naturais da exposição ao radão, como ocorre a exposição das populações, quais as populações que estão mais expostas, quais são os efeitos da exposição ao radão na saúde humana, a evolução e a gravidade destes efeitos ao longo do tempo, o conhecimento da população relativamente a este assunto, a evolução histórica do conhecimento, caracterização desta exposição e dos seus efeitos na saúde e sua prevenção e mitigação, quais as medidas preventivas e de mitigação e quais as necessidades de investigação e conhecimento assim como as lacunas relativas ao conhecimento e ação de saúde pública em Portugal.

Pretende-se, assim, fazer uma revisão bibliográfica da literatura atual, para responder aos objetivos do estudo.

3. Materiais e Métodos

Para a elaboração deste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica a partir das bases de dados PubMed e Medline, com múltiplas associações entre as palavras: “*radon exposure and health*”, “*effects and radon*”, “*radon and radiation*”, “*radon and prevention*”, “*radon and lung cancer*”, “*knowledge and radon*”. Foram utilizados como critérios de inclusão os idiomas português, espanhol e inglês, sendo que a pesquisa foi limitada aos últimos 10 anos e a estudos em língua portuguesa, inglesa e espanhola. No entanto, não foram excluídos artigos menos recentes sempre que o seu conteúdo fosse considerado relevante para a presente revisão bibliográfica.

A pesquisa foi complementada através da consulta de referências bibliográficas dos artigos selecionados, livros da área abrangida pela tese, tendo sido também utilizadas informações obtidas nos seguintes sites: Agência Portuguesa do Ambiente (apambiente.pt), *site web* da Organização Mundial da Saúde (OMS), Radon (who.int) e Agência Portuguesa do Ambiente (apambiente.pt).

Desta pesquisa resultaram 68 artigos científicos ou capítulos de livros ou relatórios técnico-científicos, sendo os resultados obtidos demonstrados no esquema que se segue:

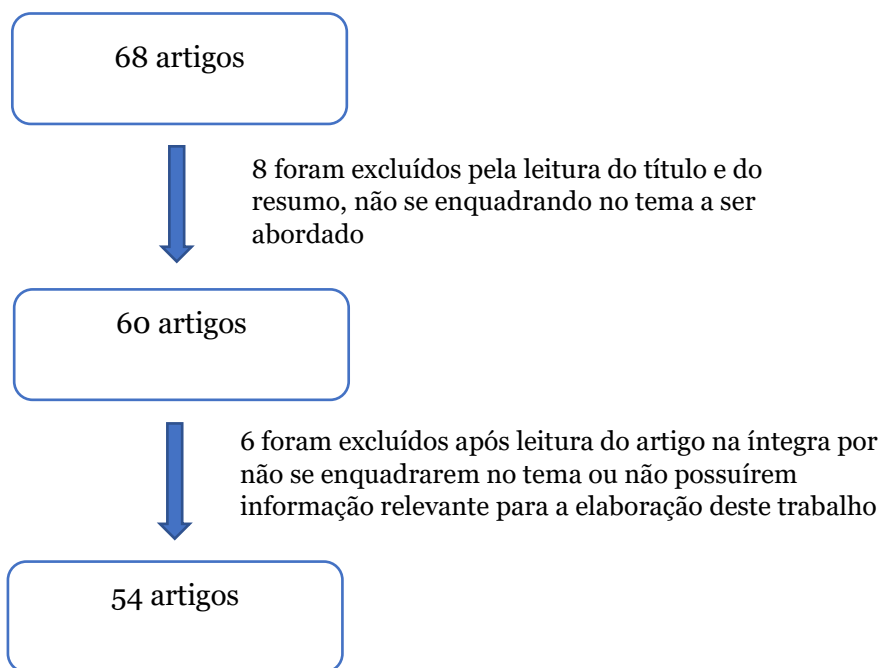


Figura 1- Fluxograma da seleção dos artigos

4. Origem e caracterização do radão e seu processo de decaimento como gás radioativo. Fontes naturais do radão. Definição

O radão é um gás nobre incolor e inodoro, tendo como uma das suas principais características a sua radioatividade. (1,3–5,8) Advém do decaimento atômico do urânio e do tório, elementos presentes no solo e em formações rochosas. O granito e a argila são as formações rochosas mais ricas nestes elementos. (9,10)

O radão dissipa-se para a atmosfera, onde é diluído, encontrando-se em concentrações muito baixas neste meio, não excedendo poucas dezenas de Bq/m³ (sendo que Bq - becquerel é a unidade SI para medir a quantidade de radioatividade e um becquerel (1Bq) é igual a uma desintegração por segundo).

O solo é responsável por aproximadamente 80% do radão presente na atmosfera, a água mineral por cerca de 19% e 1% advém de outras fontes. (2,11–13)

O radão tem uma semivida de 3,8 dias e, por si só, não impõe qualquer ameaça à saúde humana. O risco do radão advém do seu processo de decaimento, de forma a atingir a estabilidade atômica, em radão-222 e radão-220, durante o qual há libertação de partículas alfa, beta e gama. Estas últimas partículas são altamente ionizantes e responsáveis pela radiação nefasta para a saúde humana. (14–18)

Por ser um processo natural e constante, o radão encontra-se em diferentes concentrações na atmosfera terrestre e corresponde a cerca de metade da radiação de fundo registada anualmente, sendo a principal fonte de radiação para os humanos. (17,19–21)

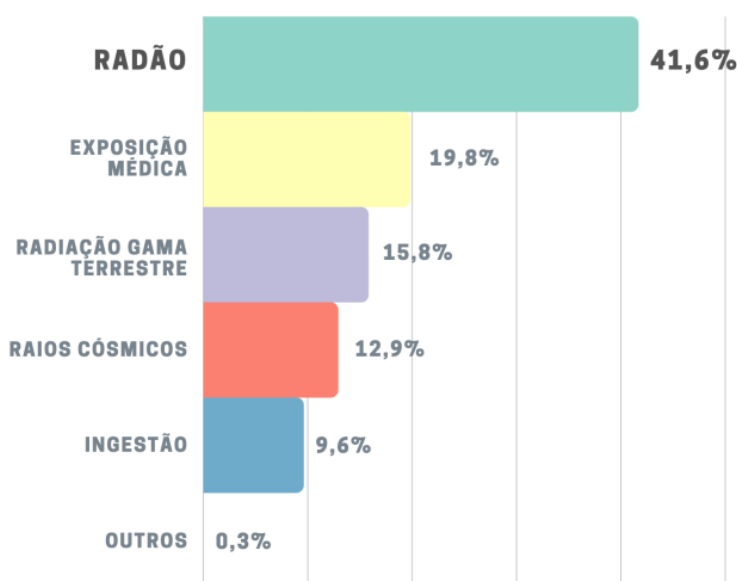


Figura 2-Percentagem da dose anual recebida pela população mundial. 2021 [imagem obtida na internet] (22)

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

O radão foi declarado como carcinogênico pela OMS em 1986, pela *International Agency for Research on Cancer* em 1988 e pela *US Environmental Agency (USEPA)* em 1987 (4,5,9). Adicionalmente foi incluído como fator de risco a evitar na última versão do *European Code Against Cancer*. A USEPA estabeleceu o limite para o radão no interior dos edifícios em $148\text{Bq}/\text{m}^3$, mas a Organização Mundial de Saúde reduziu-o para $100\text{Bq}/\text{m}^3$. (2,23,24)

5. Áreas de maior concentração atmosférica

A concentração atmosférica de radão é relativamente baixa e nunca é constante diariamente, mesmo na mesma região geográfica. Esta concentração atmosférica do radão está dependente da taxa de intensidade de libertação e de diluição do radão pelas diversas fontes presentes no ecossistema, taxas estas muito influenciadas pelas variáveis climáticas, como a pressão atmosférica e a humidade do ambiente e pelas condições meteorológicas. Assim, a concentração do radão exibe alguma variação consoante a altura do dia e a estação do ano, variações regularmente cíclicas. Desta forma, é notável que as concentrações são máximas no outono e início do inverno, e mínimas na primavera. Diariamente, são mais elevadas na manhã, já que é mais provável a ocorrência de inversões da temperatura. Depois do nascer-do-sol, o aumento da temperatura leva o radão a subir e a ocupar volumes maiores. Perto do pôr-do-sol, a concentração aumenta pela diminuição da temperatura. (2,25–27)

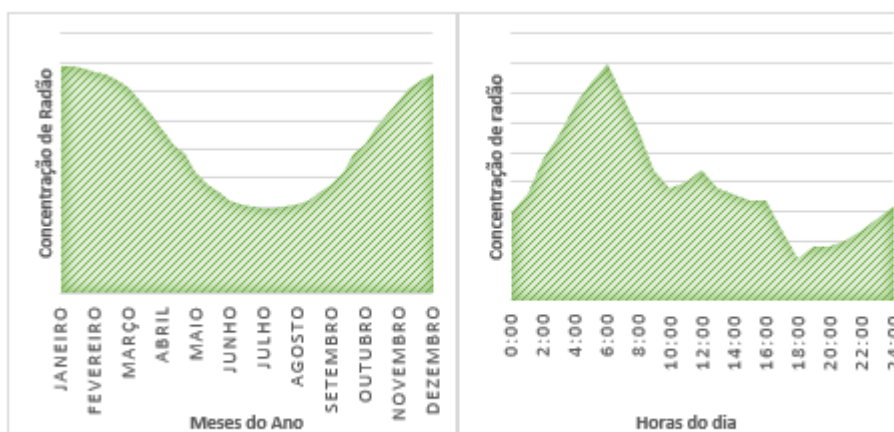


Figura 3-Exemplo das variações sazonais das concentrações de radão (à esquerda) e das variações diurnas (à direita). 2021 [imagem obtida na Internet] (28)

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

A concentração média de radão mundial na atmosfera é de cerca de 10 Bq/m³ e depende de vários fatores como o conteúdo de urânio e tório presente no solo, a sua porosidade e humidade, o tipo de sedimentos que cobrem estas formações rochosas, a velocidade do vento, a pressão atmosférica, a temperatura do ambiente, a precipitação, entre outros. (10,26)

Vários estudos realizados na Polónia e na Áustria demonstraram influência das características do terreno e parâmetros associados, como as condições atmosféricas, na concentração atmosférica de radão. Ambos descreveram que o teor de urânio e, subsequentemente de radão, era superior em zonas ricas em rochas graníticas ou em migmatitos (é uma rocha metamórfica originada de uma rocha da família dos granitóides) quando comparado com zonas constituídas por gnaisse (é uma rocha de origem metamórfica, resultante da deformação de sedimentos arcóscicos ou de granitos). (10,26) O teor mais baixo de urânio foi registado no solo coberto por rochas sedimentares siliciclásticas (constituem a grande maioria das rochas clásticas, tendo como composição materiais ricos em silício, na forma de quartzo ou de outros silicatos) com baixo nível de alterações metamórficas. As escombreliras (acumulação de minerais sem aproveitamento de uma mina em exploração ou de desmontes, por exemplo em locais de exploração de antigas minas ou pedreiras. Assim, são constituídas por entulho geológico não consolidado e não coberto por vegetação o que facilita a emanação do radão) foram os locais com o teor de radão mais elevado da cidade e, sendo constituída por resíduos geológicos não consolidados e esmagados, não cobertos por vegetação, origina um ambiente propício para a emanação do radão. (10) Nesta formação geológica, a concentração de radão atingiu o seu pico nas estações da primavera e do verão, enquanto no centro da cidade, o nível de radão atmosférico máximo foi registado no inverno e na primavera. (10) Esta diferença pode ser explicada pelas diferenças climáticas de cada local: a escombrelira segue o padrão de um clima mais temperado, com uma intensa circulação de ar, aumentando a concentração do radão com o aumento da temperatura; enquanto o centro da cidade padece de um “aprisionamento” do ar na época fria do inverno, o que aumenta, assim, a concentração de radão atmosférico. (10) O coeficiente de correlação registado entre o conteúdo de urânio no solo e a concentração atmosférica de radão foi de 1. (10) No que toca ao conteúdo de tório no solo, não foi possível estabelecer uma relação, dado que o coeficiente foi de 0,05. (10) Esta diferença pode ser explicada pelo facto da semivida dos isótopos de radão formados pelo decaimento do tório ser mais curta do que daquelas que derivam do decaimento do urânio (sendo a primeira de 55 segundos e a segunda de 3 dias), o que impede que estes possam migrar e se propagar por distâncias e altitudes semelhantes. (10)

Como já referido, a concentração de radão depende fundamentalmente dos materiais que constituem a crosta terrestre da região, especialmente da concentração de urânio-238

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

nestes. (9,10,26) Existem mapas geográficos de radão que permitem avaliar o risco de exposição ao radão da população, dependendo da região geográfica. Deste modo, estes mapas podem estimar quais as regiões onde têm o risco mais alto de desenvolver efeitos nefastos na saúde humana, como a neoplasia do pulmão e quais as regiões que carecem de políticas de saúde pública para diminuir as concentrações de radão residencial. (25,29,30) Estes mapas são elaborados tendo em conta a concentração de radão atmosférico e a densidade populacional. São muito úteis para os construtores civis, arquitetos, engenheiros e para a população geral, para se manterem informados sobre o risco da exposição e a necessidade de desenvolver medidas adicionais para diminuir a concentração de radão no interior das suas casas, e assim conseguirem prevenir os efeitos prejudiciais na saúde das populações (9,26,30) Estes mapas também têm utilidade para a comunidade científica, estabelecendo quais as regiões com maiores concentrações de radão, podendo assim ser desenhados estudos regionais que avaliem melhor o impacto deste elemento na saúde humana. (9,26)

O primeiro estudo realizado em Portugal para avaliação da concentração de radão no interior das habitações iniciou-se em 1987 (30), tendo demonstrado que a concentração média de radão em Portugal Continental é de 37 Bq/m³. Foi realizado também um mapa de suscetibilidade à exposição ao radão, onde é possível visualizar se a habitação ou local de trabalho estão situados numa zona de maior risco ou suscetibilidade e assim tomar as medidas necessárias de acordo com a especificidade do local. Com os dados obtidos através deste estudo, foi desenhado um mapa de radão português pela Direção Geral do Ambiente em 1995, que foi posteriormente atualizado em 2005 pelo Instituto Tecnológico e Nuclear (figura 4A). Em 2020, foi feito um novo levantamento nacional para caracterizar as zonas de risco, o que contribuiu para a elaboração de um novo mapa de risco (figura 4B). Neste, as áreas geográficas encontram-se agrupadas em três níveis de risco: elevado (zonas em que o nível de referência nacional é excedido em pelo menos 10% dos edifícios); moderado (zonas onde é previsível ocorrerem excedências em pelo menos 10% dos edifícios) e baixo (zonas onde não é expectável haver excedências em pelo menos 10% dos edifícios). (30)

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

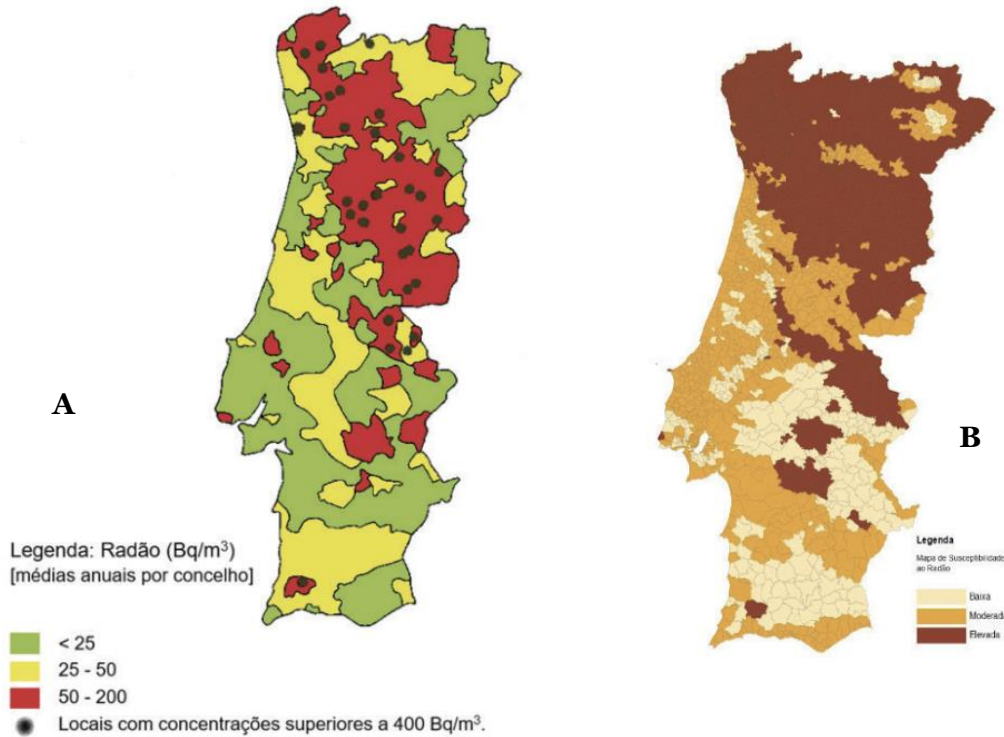


Figura 4- Mapa de suscetibilidade ao radão. (A) Instituto Tecnológico e Nuclear, 2005; (B) Agência Portuguesa do Ambiente, 2022 [imagem obtida da Internet]. (31)

Existe também uma vigilância e um controlo europeu: ver mapa de concentrações de radão da Comissão Europeia, que se encontra na figura 5.

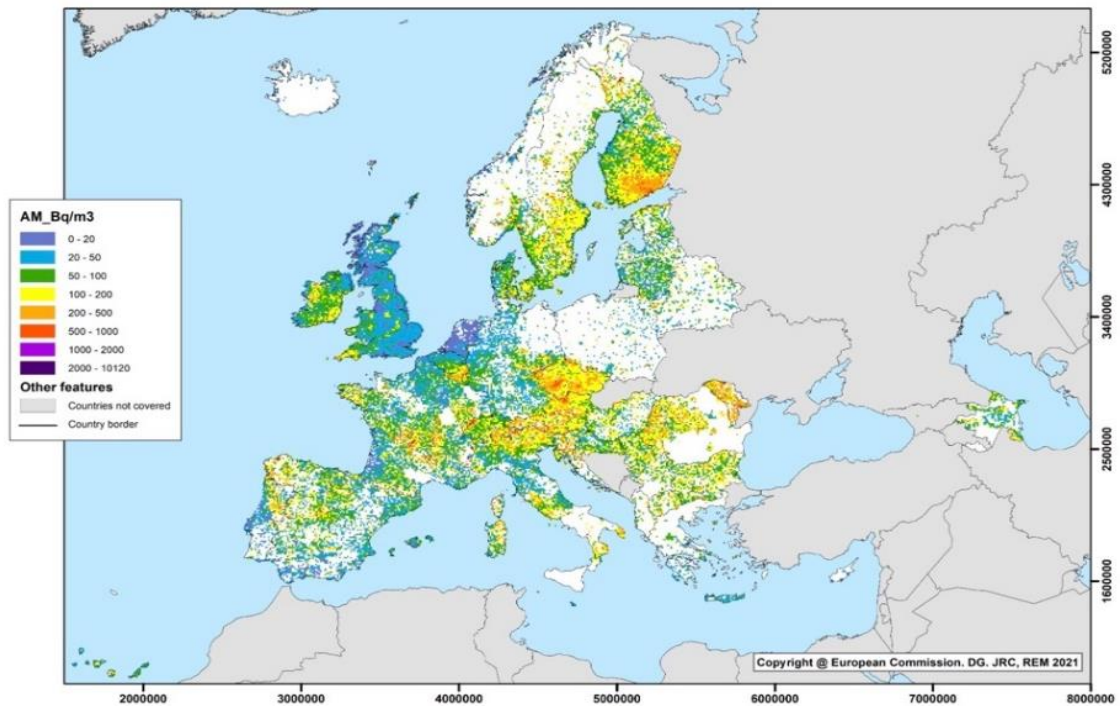


Figura 5-Mapa europeu do radão interior da Comissão Europeia. (Figura obtida no artigo *Riudavets et al* (5))

Contudo, deve ter-se em consideração que um mapa de suscetibilidade dá apenas a indicação dos níveis médios de radão para uma determinada zona, não devendo ser utilizado para prever o nível de radão num edifício. (30,32) Para tal, devem ser feitas medições individuais de forma a quantificar qual a concentração de radão em determinado edifício.

6. Acumulação em edifícios

O termo “radão residencial” engloba o radão presente não só em casas, mas também noutros espaços fechados, tais como locais de trabalho e outros edifícios que frequentamos. (2,3,5,33) O radão está classificado pela *IARC (The International Agency for Research on Cancer)* como carcinogénico, causando neoplasia pulmonar, pelo que a sua acumulação em espaços fechados associada a elevadas concentrações deste gás acarreta riscos para a saúde humana. (30,32,34–37) A concentração de radão no interior dos edifícios está altamente dependente da concentração de radão nessa área geográfica e da concentração de urânio e tório dessa região. A pressão atmosférica dentro desses edifícios é inferior à pressão do subsolo, sendo o radão atraído para dentro dos edifícios por difusão, através de soluções de continuidade ou pelos limites de construção do piso e das paredes (16,17,19,20,29). A temperatura, a humidade, a ventilação, a distância a que se encontra do solo e a existência de atividades humanas dentro de um espaço fechado são algumas das variáveis que influenciam a quantidade de radão presente no interior desse mesmo espaço (2,26,33).

O radão no interior dos edifícios é a principal fonte de exposição humana à radiação natural, contabilizando cerca de 50% desta. (1,9,15,30)

Como o radão é cerca de nove vezes mais denso que o ar, este tende a concentrar-se mais facilmente em edifícios mais baixos ou nos andares mais térreos. (36) A difusão de radão a partir do subsolo é a segunda maior fonte de exposição, seguindo apenas o radão proveniente dos materiais de construção. (20)

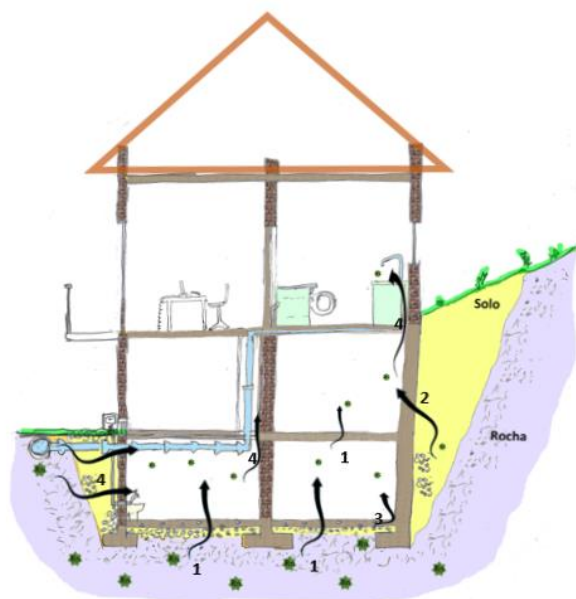


Figura 6-Esquema das vias de entrada do radão para o interior de edifícios. [imagem obtida na internet]. 2021. (38)

Outra fonte de radão dentro dos edifícios são os materiais de construção que têm radão incorporados na sua matriz. (17,20,29) Os tijolos de barro, por exemplo, emanam maiores quantidades de radão para o interior dos edifícios que os de cimento, e a ventilação mecânica dos espaços aumenta a exposição a este gás, quando comparados com sistemas de ventilação natural. (36) O radão também pode ser libertado da água residencial, especialmente nas instalações sanitárias dos edifícios. Um fator com grande impacto na concentração de radão no interior de um edifício é o número de horas e/ou vezes que o edifício é deixado a ventilar, sendo que a renovação do ar diminui os níveis de radão. Assim, durante o Outono e o Inverno, em que as janelas e portas permanecem fechadas, é frequente a concentração de radão residencial ser mais elevada. Estima-se que uma janela entreaberta consiga reduzir os níveis de radão no interior de uma casa até 70%. (2,3,9,26,33,39)

No caso da exposição ocupacional, (como por exemplo a exposição a que estão sujeitos os trabalhadores e utilizadores de estabelecimentos termais e de grutas turísticas, os trabalhadores da construção civil e dos spas assim como os oleiros) as concentrações de radão mais elevadas podem ser encontradas em locais subterrâneos, sem adequada ventilação, ou em ambientes com plantas com grande necessidade de água. (2,39)

O radão é solúvel em água fria, mas a sua solubilidade diminui significativamente quando a temperatura da água aumenta, o que implica a que haja uma maior libertação de radão durante os processos que envolvem água quente, como tomar banho, lavar a loiça e roupa. (33) Quando a casa é aquecida, principalmente no inverno, o ar quente sobe, o que cria uma pressão negativa que promove a libertação de radão do solo. (28)

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

A diferença de concentrações entre edifícios públicos e residenciais foi também registada, sendo maior nestes últimos, dado que os espaços públicos estão habitualmente associados a protocolos de limpeza previamente definidos e a uma frequente ventilação e renovação do ar. (33)

Curado et al. (36) referem que o risco associado com esta exposição depende não só da concentração de radão em espaços fechados, mas também do número de ocupantes, do período de ocupação, da ventilação e da localização do espaço dentro do edifício.

Em 2018, foi realizado um estudo na Malásia em que foram comparados 2 edifícios, de forma a analisar a concentração de radão durante oito horas de trabalho: um construído nos anos 70, com tijolos de barro e sistemas de ventilação mecânica (com exaustores a fazer a extração de ar) e outro, mais recente, construído nos anos 2000, com tijolos de cimento, ventilado naturalmente e com instalação de ar condicionado, pelo que a circulação de ar era sempre feita dentro da mesma divisão. O edifício mais recente mostrou níveis de radão ligeiramente mais altos (3,17 Bq/m³), quando comparado com o edifício mais antigo (2,33 Bq/m³), apesar de estarem ambos em níveis muito abaixo do limite recomendado pela OMS de 100 Bq/m³. (36) Esta diferença pode estar relacionada com a ventilação mais débil do segundo edifício, dado que este depende apenas da ventilação natural através das janelas, que estavam fechadas durante o período avaliado. Além disso, o facto de existir ar condicionado neste edifício proporciona um aumento da concentração de radão no seu interior, dado que não há renovação do ar no interior do edifício. A concentração de radão foi mais elevada em salas que não eram tão utilizadas e que, conseqüentemente, não teriam comunicação de ar com outras divisões. Não foi encontrada uma diferença significativa na concentração de radão entre os diferentes pisos, contrariamente ao que seria de esperar, dado que os pisos mais térreos apresentam, geralmente, valores mais elevados de radão. A concentração de radão avaliada durante as 8 horas atingiu o seu pico de madrugada e o seu valor mais baixo durante a tarde, o que poderá ser explicado pelo movimento ou falta dele nas salas, que envolve uma maior ou menor circulação de ar nas mesmas. Outros estudos também comprovaram que as habitações mais antigas têm uma concentração de radão superior. (2,5,9,26,33,36,40)

Em Portugal, são três os principais estudos com o objetivo de medir as concentrações de radão em edifícios: em 2007, foi realizado o "Estudo Nacional de Radão em Habitações", pela Direção-Geral da Saúde, e teve como objetivo avaliar a exposição ao radão em residências em todo o país. Foram realizadas medições em cerca de 3.000 habitações, abrangendo diferentes regiões de Portugal. De 2012 a 2016 foi levado a cabo o Projeto RADONORM, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, e que teve como objetivo avaliar os níveis de radão em escolas e creches em Portugal. Foram realizadas medições em mais de 300 edifícios escolares em todo o país. De 2017 a 2020, o "Estudo

RADON-Buildings", financiado pelo Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (POSEUR), mediu os níveis de radão em edifícios públicos e privados em Portugal, como habitações, escolas, hospitais e locais de trabalho. (41)

7. Ciclo de degradação e atingimento do organismo

O radão e os isótopos resultantes da sua decomposição entram no corpo humano através da sua inalação ou deglutição. (1,3–5,8) A grande maioria do radão inalado é expulso das vias aéreas durante a expiração no ar exalado. No entanto, há sempre uma pequena quantidade de partículas que permanece no pulmão e que, no decorrer do processo de decaimento natural do radão, libertará partículas alfa e beta que permanecem no epitélio brônquico induzindo o dano epitelial. (2,9,12,14,17,24)

Durante a respiração, o radão dissolve-se na corrente sanguínea através da troca gasosa que ocorre nos capilares, entrando assim na circulação sistémica e atingindo, através da difusão, diversos órgãos, como o fígado e os rins. (2,23,42)

As partículas alfa são geralmente bloqueadas pela barreira cutânea, só conseguindo atingir as células quando se encontram ou são geradas dentro do corpo, como é o caso da inalação das partículas de radão. (1,3,5,8) Estas partículas têm a capacidade de se acumular em grandes quantidades nos tecidos, libertando uma grande quantidade de energia radioativa, podendo assim desencadear não só processos de carcinogénese, como também outros processos celulares e biológicos responsáveis por outras doenças respiratórias, como a doença pulmonar obstrutiva crónica (DPOC). (2,12,14,24,29)

8. Carcinogénese

8.1 Ação do radão sobre o epitélio pulmonar

A radiação alfa liberta uma grande quantidade de energia e, apesar de ter uma curta área de alcance, esta tem uma elevada efetividade biológica, reagindo com o ADN das células do parênquima pulmonar (3,5,9), gerando stress oxidativo que culminará em múltiplos efeitos citotóxicos e genotóxicos, como quebras de ligações entre as cadeias de dupla-hélice do ADN, mutações, deleções, substituições genómicas e rearranjos cromossómicos, o que favorece o processo de carcinogénese. (2,11,33,35,36)

Para além disso, numa população cronicamente exposta à radiação natural, uma pequena dose de radiação pode afetar e modificar o próprio sistema imunitário e a interação que este tem com as células neoplásicas, alterando assim o microambiente tumoral. (5,8,12)

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

O stress oxidativo provocado pelos radicais livres origina inflamação pulmonar, o que irá contribuir ainda mais para o ambiente de proliferação celular, proporcionando um atraso na mitose, a inibição da apoptose, as alterações na regulação das citoquinas e o aumento da produção de proteínas associadas à regulação do ciclo celular, mesmo entre as células mutadas, o que favorece também o processo carcinogénico. (2,9,43)

As partículas alfa têm uma grande capacidade de provocar dano no epitélio do trato respiratório, sendo este especialmente sensível à radiação. (5,9) Até a exposição mais baixa impõe um potencial carcinogénico se a radiação alcançar e alterar geneticamente qualquer componente das cadeias de ADN. (3,8,11,36)

Não há nenhum padrão de mutação do gene P53 que possa estar ligado à exposição ao radão, tal como é definido por vários estudos. (9)

Um estudo sugeriu que a exposição ao radão pode estar relacionada com o encurtamento dos telómeros dos cromossomas e que este pode ser o mecanismo da carcinogénese associada a este elemento, mas esta conclusão precisa de mais estudos que a comprovem. (9) Outro estudo propôs que o papel do radão enquanto carcinogénico consistia na expressão de mutações *EGFR* (*Epidermal growth factor receptor*) e translocações *ALK* (*anaplastic lymphoma kinase*). Ainda assim, nenhuma destas conjecturas foi provada sendo necessários mais estudos que avaliem o percurso da carcinogénese associado a este elemento. (9)

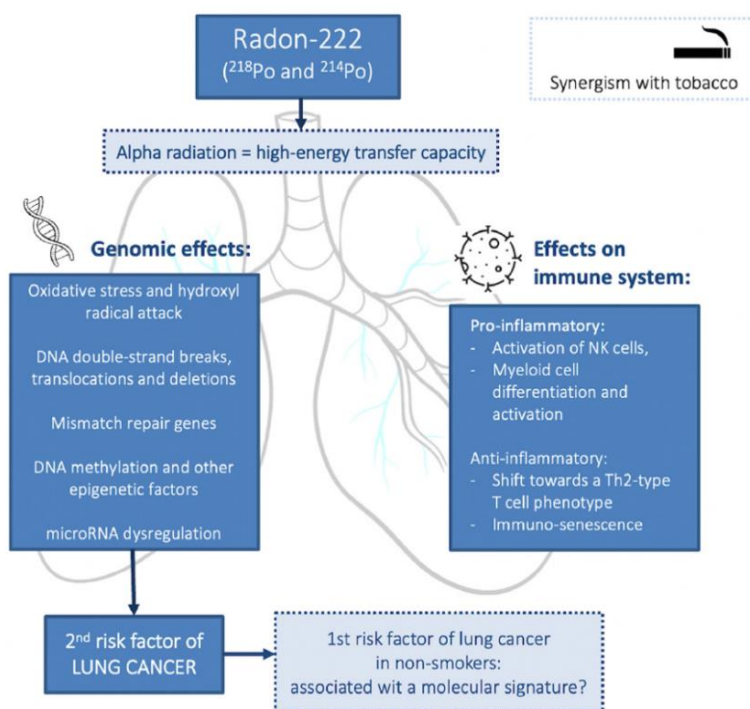


Figura 7-Radon-described mechanisms of carcinogenesis in lung cancer. (Figura obtida no artigo Riudavets et al (5))

8.2 Sinergismo com o tabaco e outros carcinogéneos

O efeito combinado do radão com o fumo do tabaco é comprovadamente sinérgico, aumentando entre 20 a 25 vezes o risco de cancro do pulmão, já de si aumentado em fumadores, especialmente quando este grupo populacional está exposto a uma concentração de radão superior a 200 Bq/m³. (1,3,5,8) Este fenómeno pode ser explicado pelas alterações estruturais provocadas pelo fumo do tabaco, como o desaparecimento dos cílios do trato respiratório, o aumento da produção de muco e o aumento da frequência respiratória, que levam a uma acumulação do radão e dos seus isótopos no parênquima pulmonar e a um conseqüente aumento da radiação absorvida, quando comparado com um pulmão saudável. (11,12,17,24,33)

Há também outros agentes carcinogénicos com os quais o radão tem um efeito sinérgico, como é o caso das partículas de poluição atmosférica, como poeiras ou aerossóis, que facilitam a inalação, a deposição no epitélio pulmonar e o decaimento do radão, dado que atuam como vetor de transmissão do radão, estando já descrita em diversos estudos, a associação positiva entre as partículas finas atmosféricas, as altas concentrações de radão e o aumento da mortalidade. (5,14,17)

Há também um efeito cumulativo entre a exposição ao radão e a exposição à sílica, que também provoca alterações no parênquima pulmonar, como a fibrose. (3,12,44)

8.3 Associação com a neoplasia pulmonar

A neoplasia pulmonar tem um grande impacto a nível mundial, tendo um grande peso na saúde pública mundialmente. Tem se tornado cada vez mais prevalente, com mais de 2,2 milhões de casos diagnosticados em 2020, sendo a segunda neoplasia mais prevalente, seguindo apenas a neoplasia da mama. (9,23) É a principal causa de morte relacionada com cancro a nível mundial, com cerca de 1,8 milhões de mortes em 2020. Apesar dos avanços conquistados na área da medicina no seu diagnóstico e tratamento, esta neoplasia permanece extremamente letal, essencialmente pelo facto de mais de metade dos diagnósticos serem feitos quando a neoplasia já se apresenta no estágio IV. (1,5,44)

O cancro pulmonar é uma doença multifatorial, com múltiplos fatores de risco, sendo o mais importante o tabagismo. Ainda assim, cerca de 20 a 25% de todas as neoplasias pulmonares ocorrem em pessoas que nunca fumaram, existindo, portanto, outros fatores de risco que se devem ter em consideração. (9,44) O radão residencial é o segundo fator de risco com mais impacto para a neoplasia pulmonar nos fumadores, e o mais relevante em não-fumadores. (23,25,26,33)

A OMS estima que 3 a 14% de todas as neoplasias pulmonares mundiais são causadas pela exposição ao radão. (33) Alguns estudos demonstram que proporção estimada de neoplasia pulmonar que ocorre devido ao radão residencial na Europa varia

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

entre 3%, no Reino Unido, e 23%, em Portugal. (25) Quanto ao número de mortes por cancro do pulmão devido ao radão, este valor varia entre 3% no Reino Unido, e 17% na Roménia. (39) Estes resultados corroboram a estimativa de que 9% das mortes por cancro do pulmão na Europa podem ser atribuídas ao radão. (5,9,34) Muitos estudos internacionais demonstraram um aumento no risco de desenvolver uma neoplasia pulmonar associada à exposição a altos níveis de radão no interior dos edifícios. (2,11,23,25,44) Em estudos europeus, o aumento do risco de cancro pulmonar por cada 100Bq/m³ de radão residencial foi de 8%, aumento que não diferiu significativamente no sexo ou na idade. (39) Darby *et al.* (39) indicaram que 9% das mortes por neoplasia pulmonar na Europa podem ter como causa atribuída a exposição ao radão no interior dos edifícios.

Vários estudos na população geral foram realizados, a maioria com desenhos de caso-controlo, tendo populações heterogêneas, e demonstrando uma relação entre o aumento do risco de neoplasia pulmonar e a exposição ao radão residencial. (1,9,39,44) Um estudo europeu que conjugou dados de 13 estudos diferentes envolvendo 9 países, confirmou uma relação linear entre o radão residencial e a neoplasia pulmonar, com o aumento de 16% de risco em cada 100Bq/m³ de aumento de concentração de radão medido. (4) Outro estudo, da América do Norte, envolvendo dados de 7 estudos, comprovou um aumento de 11% do risco de desenvolver uma neoplasia pulmonar por cada 100Bq/m³ de radão residencial. Ambos estes estudos comprovaram uma relação linear e estatisticamente significativa entre estas duas variáveis. (25)

Peterson *et al.* (33) estimaram que 13,6% das mortes por neoplasia pulmonar numa província do Canadá decorreram da exposição ao radão, e que, se todas as casas com concentrações acima de 200Bq/m³ diminuíssem para os 200Bq/m³, 91 mortes seriam prevenidas anualmente e cerca de 233 mortes poderiam ser prevenidas se os níveis de radão diminuíssem para os 100Bq/m³. (33)

Foram também conduzidos vários estudos em populações expostas a baixos níveis de radão, que demonstraram que o radão residencial é um fator de risco relevante para o desenvolvimento da neoplasia pulmonar mesmo em níveis de exposição inferiores aos estabelecidos pelas *guidelines* internacionais. (9,25) Alguns estudos provam que o risco absoluto de neoplasia maligna pulmonar aos 75 anos em concentrações de radão de 0, 100 e 400Bq/m³ é de 0,4%, 0,5% e 0,7%, respetivamente, para não fumadores e é cerca de 25 vezes maior para fumadores (10%, 12% e 16%, respetivamente). (4,26) Concluiu-se também que a relação dose-resposta é linear, não existindo dose de segurança, havendo assim um aumento do risco mesmo com doses de exposição baixas. (36) Mesmo em concentrações menores do que as definidas pelas *guidelines*, o radão pode levar a um aumento de 2,5 vezes de cancro do pulmão. (33)

9. Primeiros estudos

A publicação de estudos epidemiológicos sobre a relação entre o risco de cancro do pulmão e a população mineira remonta aos anos de 1960. (2,25) Desde então demonstraram sistematicamente uma associação positiva entre a exposição cumulativa ao radão e a morte por cancro pulmonar, associação esta que persistiu após o ajuste dos fatores confundidores como a exposição a arsénio, sílica, entre outros. (4,24) Estes revelaram que a população estudada tem três vezes mais probabilidade de morrer por neoplasia pulmonar do que a população geral. (3,23)

O primeiro estudo realizado de forma compreensiva para estudar a relação entre a exposição ao radão e o risco associado de cancro do pulmão em mineiros foi o *Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR) IV report*, que incluiu vários estudos *cohort* com mineiros do Colorado, dos Estados Unidos da América. (4) Segundo este relatório, o excesso de risco relativo por 100 *working level per month (WLM)* (sendo *working level (WL)* a quantidade de radão ou dos seus isótopos que estão presentes em cada m³ de ar, cujo decaimento liberta 1.3×10^5 MeV de energia potencial proveniente de partículas alfa, e WLM a exposição cumulativa de um indivíduo a uma concentração de 1WL durante um horário laboral de 170 horas mensais) foi de 1.3. (39) Também foram revelados fatores modificáveis do risco relativo como o tempo desde a exposição, a idade do início da exposição e a taxa de exposição. (4) Assim, concluíram que mineiros expostos em idades mais precoces e com uma exposição a uma concentração relativamente baixa de radão tinha uma maior probabilidade de morte com cancro do pulmão por WLM, quando comparados com outros mineiros. (4,46) Ao longo do tempo, as condições do trabalho dos mineiros têm vindo a melhorar drasticamente, com a introdução de ventilação e medidas de proteção radiológica, levando a uma melhoria da qualidade do ar, nomeadamente a diminuição da concentração de radão à qual os mineiros estão expostos. (24) Apesar disso, estudos mais recentes mostram um maior excesso de risco do que estudos mais antigos, o que pode ser justificado pela melhor colheita de dados e pelo aperfeiçoamento das medições efetuadas. (24)

10. Extrapolação de estudos dos mineiros para a população geral

A extrapolação do risco de exposição ocupacional do radão em mineiros para o risco associado à exposição residencial da população geral pode ser difícil, sendo este um dos pontos mais criticados no modelo BEIR IV. (1) Isto porque, primeiramente, o impacto do radão residencial na saúde é mais difícil de avaliar dado que a dose de radão em ambiente

doméstico é cerca de cem vezes inferior quando comparado com a concentração de radão atmosférico das minas. (9) Além disso, os mineiros podem ter taxas de respiração diferentes à da população geral, não só pelo ambiente subterrâneo, mas também por outras patologias pulmonares que também são mais frequentes na população mineira que na população geral, que podem alterar a configuração da árvore traqueobrônquica, a taxa de ventilação e a frequência respiratória. (39) Por outro lado, a composição da atmosfera das minas é rica noutros carcinogêneos, como o arsénio e várias poeiras, elementos que não se encontram usualmente presentes na atmosfera das casas. (1,4) Deve-se também ter em consideração que as características das populações em questão são diferentes, dado que a população mineira consiste em homens jovens, enquanto a população geral é mais heterogênea, tornando a extrapolação para a população feminina mais difícil. (9)

Apesar de todas estas inconsistências, a maioria dos estudos continua a utilizar o modelo do BEIR-VI, assumindo que o risco de neoplasia pulmonar devido à exposição ao radão dos mineiros é semelhante ao da população geral, e que a taxa de mortes atribuídas ao radão varia linearmente com a exposição cumulativa a este elemento. (4,33)

10.1. Fumadores

O risco de neoplasia pulmonar induzida pelo radão é muito superior em fumadores, dado que fumadores expostos a concentrações maiores de radão têm um risco muito maior do que os fumadores expostos a uma menor concentração de radão de desenvolver uma neoplasia pulmonar. (9,11,23,24) Para não fumadores, viver numa casa com níveis de concentração de radão no seu interior de 0, 100 ou 800 Bq/m³ implica um risco de morte por neoplasia pulmonar de 4, 5 ou 10/1000 habitantes, respetivamente. (34) Por outro lado, para fumadores, esse risco torna-se substancialmente maior, nomeadamente com 100, 200 e 220/1000 habitantes, respetivamente. (34) Para os que já fumaram, mas que não têm atualmente hábitos tabágicos, o risco é substancialmente mais baixo do que o dos fumadores, mas permanece consideravelmente alto quando comparado com os não-fumadores. (34)

De acordo com o relatório BEIR VI, o risco de morte devido a uma neoplasia pulmonar induzida pelo radão em não-fumadores é de 7 em 1000 habitantes, sendo que este aumenta para até 62 /1000 habitantes para fumadores que foram expostos a concentrações tão baixas quanto 37 Bq/m³, demonstrando, assim, uma relação sinérgica. Outro estudo demonstrou também que fumadores expostos a níveis de radão inferiores a 37 Bq/m³ tinham um risco aumentado de 20,16 de desenvolver neoplasia pulmonar, enquanto os expostos a concentrações superiores a 37 Bq/m³ tinham um aumento do risco de 46,45. (9)

É relevante mencionar que para fumadores expostos a elevadas concentrações de radão, a melhor maneira de reduzirem o risco de desenvolverem uma neoplasia pulmonar é através da cessação tabágica, dado ser este o principal fator de risco, seguido da diminuição da concentração de radão no interior de suas casas. (9)

10.2. Não-fumadores

Define-se como não-fumador qualquer pessoa que tenha fumado menos de cem cigarros ao longo de toda a sua vida, segundo a OMS e o *International Consortium for Health Outcomes Measurement*. (1,44) A neoplasia pulmonar em não-fumadores foi reconhecida como uma doença distinta da neoplasia que afeta fumadores e é a sétima causa mais comum de morte por neoplasia mundialmente, representando cerca de 20 a 25% de todos os casos de neoplasia diagnosticados. (5,9) Nesta população específica, a mortalidade é maior, dado que a deteção precoce é muito difícil. (23) Foram identificados numerosos fatores de risco para esta neoplasia, como a exposição ao radão, asbestos, fumo de cigarro ambiental, poluição atmosférica, sílica, crómio, berílio, cádmio, arsénio, entre outros. O radão foi identificado como sendo o principal fator de risco para a neoplasia pulmonar em não-fumadores. (2,4,10,23,25,33)

Para estabelecer uma relação entre a exposição ao radão e o desenvolvimento de neoplasia pulmonar em não-fumadores de forma cientificamente correta, é necessário utilizar e organizar estudos cuja população em estudo seja este grupo específico de pessoas, ao invés de extrapolar o risco conhecido de fumadores, dado que este é o maior fator de confundimento neste tema. (1,11) Estudos que envolvam apenas a população não-fumadora são recomendados para diminuir a influência do tabagismo sobre os resultados, dado que o impacto deste fator é bem maior do que a diferença de concentrações de radão nos diversos domicílios avaliados. (24)

Num estudo realizado em não-fumadores foi encontrado um aumento do risco relativo de 15% de desenvolvimento de neoplasia pulmonar, quando estes estiveram expostos a 100Bq/m³ de radão. (1) O aumento de risco relativo foi de 46% para os homens e de 9% para as mulheres, ambos não-fumadores, com esta diferença entre ambos os grupos a ser estatisticamente significativa ($p=0.027$). (1) Uma revisão sistemática de 2014 que envolveu 14 estudos, sendo estes maioritariamente europeus ou norte-americanos e tinham heterogeneidade das populações analisadas, demonstrou que há um aumento significativo no risco de desenvolver um cancro do pulmão em não-fumadores, não tendo encontrado outras associações. (9) Estudos realizados em zonas com concentrações atmosféricas mais elevadas de radão, como o nordeste espanhol, demonstrou uma relação clara entre a exposição a este elemento em não-fumadores e o aumento do risco de neoplasia pulmonar. (11)

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

Não-fumadores que são expostos a fumo de cigarro passivo inalam os mesmos compostos cancerígenos que os fumadores, sendo que o risco de desenvolver carcinoma pulmonar aumenta 20 a 30% em não-fumadores expostos a fumo de cigarro passivo em casa ou no local de trabalho. (9) Qualquer exposição ao fumo de cigarro, mesmo que passiva, tem um efeito sinérgico com o radão residencial. (1,5,9,39) Em um estudo realizado apenas em não-fumadores, foi demonstrado que, para concentrações de exposição semelhantes ($>200 \text{ Bq/m}^3$), coabitantes de fumadores que estavam expostos ao fumo do cigarro de forma passiva tinham uma *OR (odds ratio)* de 2,75 quando comparado com a de 1,99 daqueles que não expostos ao tabaco de forma passiva nas suas casas. (9)

Há dados contraditórios sobre a idade ao diagnóstico deste cancro em não-fumadores, dizendo uns que a idade será mais avançada, segundo uns estudos franceses, e que será mais precoce, segundo estudos asiáticos. (44) A duração de indução de cancro do pulmão pela exposição ao radão é de cerca de 5 a 25 anos. (11) Regra geral, na Europa e nos EUA, a neoplasia pulmonar em não-fumadores é diagnosticada na mesma média de idades ou ligeiramente mais tardiamente que nos fumadores, que ronda os 65 anos. (44) Um estudo de 2015, realizado na Galiza, uma região espanhola com um solo rico em granito e, por isso, considerada uma região com concentrações mais altas de radão atmosférico, demonstrou que os níveis de radão residencial foram mais elevados para os pacientes que tiveram um diagnóstico a uma idade mais precoce, com menos de 50 anos. (44) De facto, estes indivíduos tinham cerca do dobro da média de exposição ao radão residencial daqueles cujo diagnóstico se situou entre os 61 aos 70 anos. (44) Ainda assim, não se demonstrou diferença estatisticamente significativa entre a exposição ao radão e os diferentes grupos etários ao diagnóstico, dado que a população deste estudo tinha poucos indivíduos com menos de 60 anos. (44) As concentrações de radão residencial têm de ser mais elevadas para existir um diagnóstico em idades mais jovens, dado que é necessária mais radiação para encurtar o período de indução normalmente necessário para o desenvolvimento de um carcinoma. (44) Este estudo permitiu concluir que é mais importante a concentração de radão de exposição do que propriamente a duração dessa exposição, contrariamente ao que acontece com o tabagismo.

Há estudos que associam a exposição ao radão em não-fumadores ao carcinoma pulmonar de pequenas células ou epidermoide, outros que o associam mais a tipos histológicos mais incomuns, como o de grandes células, especialmente com exposições a radão residencial superiores a 147 Bq/m^3 . (33) No mesmo estudo de 2015, efetuado na Galiza, referido acima, os tipos histológicos menos frequentes de neoplasia pulmonar, como o carcinoma de células escamosas, foram associados a concentrações de radão residencial mais elevadas, de cerca de 309 Bq/m^3 . (44) Por outro lado, concentrações mais baixas de radão foram associadas ao tipo histológico de grandes células. (44) No entanto, não houve

qualquer relação estatisticamente significativa entre estes tipos histológicos e os níveis atmosféricos de radão residencial. (11) Os riscos são muito similares entre os tipos histológicos, apesar de o adenocarcinoma ser o único com um risco estatisticamente significativo maior de se desenvolver com a exposição ao radão residencial superior a 200 Bq/m³. (44) Rodríguez-Martínez *et al.* (33) e outros estudos concluíram que o subtipo de cancro do pulmão causado pela exposição ao radão é o carcinoma de pequenas células. No entanto, pela falta de homogeneidade dos dados, conclui-se que é necessária mais investigação neste campo para estabelecer uma relação causal. (11)

11. Associação com neoplasias não pulmonares

A percentagem de estudos feitos e publicados nas grandes bases de dados (*PubMed*, *Scopus* e *Web of Sciences*) sobre o efeito do radão a nível pulmonar completa cerca de 81.9% da literatura, sendo que a referente aos restantes órgãos compreende apenas 18.1%. (2) A neoplasia pulmonar é, portanto, a mais frequentemente mencionada e para a qual mais estudos confirmam uma relação positiva estatisticamente significativa quanto ao papel etiológico do radão e dos seus isótopos na carcinogénese pulmonar. (2) No entanto, o efeito deste elemento noutros órgãos é ainda pouco estudado e, os poucos estudos elaborados apresentam resultados contraditórios. (4,9,24,33)

Um dos motivos pelo qual é mais difícil de provar a influência do radão noutras regiões anatómicas que não a pulmonar assenta na biocinética da inalação do radão, que faz com que a dose efetiva de radiação que atinge outros órgãos seja bastantes vezes mais baixa do que a que atinge os pulmões. (2,4)

Vários estudos efetuados em mineiros na Alemanha, no Colorado e na Rússia não conseguiram demonstrar uma relação entre a exposição laboral ao radão e o desenvolvimento de neoplasias do sistema nervoso central, nem um aumento da mortalidade associado a esta patologia. (2) Já relativamente à população geral, alguns estudos realizados na Dinamarca e na Espanha demonstraram uma relação estatisticamente significativa entre a exposição a elevadas concentrações de radão residencial e uma maior taxa de mortalidade devido a neoplasia gástrica e do sistema nervoso central, apenas no sexo feminino. (2)

Alguns estudos desenvolvidos em mineiros mostraram um aumento da incidência de mieloma múltiplo e um aumento da mortalidade por leucemia com a exposição cumulativa ocupacional ao radão, especialmente em minas de urânio. (24) Foi também relatado, num estudo na Inglaterra e no País de Gales, uma correlação estatisticamente significativa entre a exposição ao radão e o aumento da incidência de vários subtipos de leucemia. (4) Relativamente à leucemia em idade pediátrica, não foram encontradas

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

relações entre estas neoplasias e a exposição ao radão. (2) Sendo que a literatura mostra que a radiação não é um fator contribuidor na carga global da leucemia infantil. (2)

A taxa de mortalidade por neoplasia, incluindo a neoplasia gástrica, é elevada em populações de trabalhadores de minas. Uma meta - análise de 11 estudos coorte de mineiros relatou um aumento estatisticamente significativo na mortalidade associada à neoplasia gástrica. (4,9) Outro estudo, realizado na República Checa, demonstrou um aumento da mortalidade, não só devido à neoplasia pulmonar, mas também à gástrica, em mineiros de urânio. (2) Quanto à população geral, um estudo na Pensilvânia descreveu uma correlação positiva entre a exposição ao radão e o aumento da incidência de neoplasia gástrica no sexo feminino e um aumento da mortalidade associada a esta neoplasia no sexo masculino, feminino e em toda a população estudada. (2) *Messier et al.* (2) providenciou uma evidência epidemiológica da relação positiva entre o consumo de água mineral com o alto teor de radão e o aumento da incidência de cancro gástrico.

Relativamente ao carcinoma renal, vários estudos foram feitos e não foram encontradas relações entre a exposição ao radão ocupacional e residencial e o aumento da incidência ou da mortalidade por cancro renal. (2) O mesmo é reportado para a neoplasia da mama. (2,47)

A possível relação etiológica entre a exposição ao radão e outras neoplasias que não a pulmonar, bem como o mecanismo patogénico das mesmas, é controversa. Foram realizados vários estudos de larga escala de forma a estudar e investigar que fatores poderiam afetar a relação dose-dependente da exposição ao radão e a génese de cancros de origem não-pulmonar. (4,9) Quanto ao território ocupacional, a literatura existente é referente quase exclusivamente a mineiros. (4) Relativamente à exposição ambiental, as investigações focam-se apenas na exposição por inalação e por ingestão (devido à presença de radão na água).

Dentro das outras neoplasias, a primeira a considerar será a cerebral e do sistema nervoso central, devido ao aumento da incidência descrita associada à exposição ao radão. A dose cumulativa de radão que poderá atuar sobre este órgão pode ser justificada pelo transporte destas moléculas pelas células sanguíneas, que poderiam atravessar a barreira hematoencefálica e pela alta deposição extratorácica na cavidade nasal de partículas, que podem atingir o SNC via nervo olfativo. (2,48) Ainda assim, apesar desta possível relação, muitos poucos estudos foram elaborados de modo a estudar o possível papel da exposição do radão na etiopatogénese da neoplasia primária cerebral e do SNC. (4,48)

De forma similar, está bem estabelecido que a exposição aguda e/ou cumulativa a altas doses de radiação ionizante induz o desenvolvimento de leucemia. (24) Muito pouco se sabe acerca do efeito do radão e seus isótopos na medula óssea. (24) No entanto, um estudo recente reportou que a mucosa brônquica está repleta de linfócitos em circulação, o

que poderá sugerir que as partículas de radão e os seus isótopos podem atingir e irradiar estas células, originando, assim, neoplasias hematológicas. (2) Vários estudos foram realizados e demonstraram uma correlação positiva entre os níveis de radão residencial e o aumento da incidência de leucemia em todas as faixas etárias. (2,4)

Os resultados dos estudos realizados para verificar a associação entre a exposição ao radão e o cancro gástrico são contraditórios, apesar de existir alguma prevalência dos resultados que mostram uma associação positiva. (15)

A hipótese de neoplasia renal induzida pelo radão é possível devido ao facto de o rim filtrar o radão e a seus isótopos no fluxo sanguíneo. Durante este processo, as partículas alfa radioativas poderão interagir diretamente com as células renais, exercendo os seus efeitos carcinogénicos neste parênquima. (2) No entanto, poucos estudos foram realizados, e os que foram feitos compreenderam apenas a exposição ocupacional. Ainda assim, nenhuma associação foi encontrada, não sendo possível excluir algum tipo de interação. (2)

Os estudos têm dificuldades em estabelecer relações devido às baixas quantidades de doentes elegíveis para os mesmos, sendo necessárias mais investigações para avaliar as relações entre estas variáveis, particularmente em zonas com concentrações mais altas em atmosfera, para facilitar a avaliação dos padrões de resposta dependentes da dose. (2,4,9,24,33)

12. Associação com outras patologias não neoplásicas

O radão pode também causar doenças pulmonares não neoplásicas e/ou alterar o curso natural das mesmas. (3) Foi relatado num estudo uma relação entre o nível de exposição ao radão e o desenvolvimento de DPOC e de internamentos associados a esta patologia, especialmente em mulheres. (9) Um outro estudo mostrou que mineiros expostos ao radão são mais propensos a morrer por silicose e fibrose pulmonar, mas também por doença terminal renal na nefropatia diabética. (49) Há um efeito cumulativo entre a exposição ao radão e a exposição à sílica, que é dependente do tempo de exposição laboral em mineiros. (3) Além disso, muitas doenças pulmonares relacionadas com a exposição ao radão podem ter sido erradamente diagnosticadas e interpretadas como silicose. (3) Há também uma relação comprovada entre altos níveis de radão e malformações congénitas como a fenda labial ou palatina, com infertilidade feminina e doenças do trato urinário e bronquite crónica em idade pediátrica. (3)

A Asma é das doenças crónicas mais comum da infância. Considerando que mais de 90% do nosso tempo é passado em espaços interiores, a exposição indoor a irritantes respiratórios torna-se particularmente importante. Houve uma associação estatisticamente

significativa da exposição ao radão a curto (1, 5 e 7 meses) e a longo prazo (12 e 24 meses) com o diagnóstico de asma, assim como com o absentismo escolar. (13)

Um estudo francês demonstrou que a exposição ao radão representa um risco no aumento da mortalidade associada a doenças cerebrovasculares. (48) Outro estudo chinês também provou essa relação estatisticamente significativa. (24) Há vários mecanismos pelos quais o radão aumenta o risco de doença cerebrovascular: primeiramente, a radiação proveniente do radão induz o desenvolvimento de ateromas nas paredes das artérias pela acumulação de partículas de LDL e lipoproteínas na sua superfície, originando migração de células espumosas e lesões fibrosas. (48) Estas alterações levam ao aumento de espessura dos vasos arteriais, o que originará uma disfunção dos mesmos. Por outro lado, como já mencionado, o radão estimula um estado pró-inflamatório que leva a lesões endoteliais e posterior disfunção, outro fator para a aterosclerose. Por último, o radão aumenta o stress oxidativo, produzindo variantes de oxigénio radiativo em maior quantidade, o que subseqüentemente origina lesão vascular, reação inflamatória e aterogénese. (48)

Porém, os estudos não foram capazes de demonstrar uma relação estatisticamente significativa entre o aumento da mortalidade por patologia cerebrovascular e a exposição ocupacional ao radão. (48) Já para a população geral, a interpretação de diversos estudos realizados poderá indicar que a exposição ao radão residencial representa um aumento do risco de morte por doença cerebrovascular. (24) No entanto, a maioria dos estudos têm várias limitações, sendo inconsistentes e inconclusivos, tornando-se necessárias mais investigações para que haja evidência de relação.

13. Conhecimento da população

Em 1987, num estudo realizado nos EUA, o radão foi considerado como o risco ambiental com maior impacto negativo na saúde humana e, nesse mesmo ano, a comunidade americana descreveu este tema como “apático e desinteressante”. (49) A indiferença da população por este tema pode ter várias causas, tais como a dificuldade em associar perigo a algo que não é visível, o longo período de latência que os problemas associados ao radão têm, e o facto da exposição ocorrer num local em que toda gente o considera como seguro, nas suas próprias casas. (50) O conhecimento da população sobre o que é o radão e que este é carcinogénico é ainda muito deficitário. (4,14,17,51,52) Este elemento é muitas vezes confundido com o monóxido de carbono, tal como provam vários estudos, nos quais 30 a 50% das pessoas questionadas associam o radão a cefaleias (sintoma mais comum da intoxicação por monóxido de carbono). (49)(53) Muitas pessoas acreditam que o radão não está presente nas suas casas porque os detetores nunca detetaram nada,

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

sendo que os detetores que têm presentes nas suas casas são os detetores de monóxido de carbono. (50,54)

Mesmo para pessoas que reconhecem a existência do radão, foi demonstrado que apenas uma pequena percentagem ligeiramente superior a 20% reconhece a relação entre a exposição a este elemento e a neoplasia pulmonar e que num grupo de pessoas que efetua a testagem dos níveis de radão em suas casas, apenas 50% destes compreende esta relação. (3,33,36,50)

A falta de conhecimento do radão e dos seus malefícios está intimamente associada ao baixo rendimento, às minorias populacionais, à idade avançada, à habitação em áreas rurais e a baixos níveis de escolaridade. (50) Estudos realizados mostram que a probabilidade de um indivíduo identificar o radão como um fator de risco para neoplasia pulmonar aumenta com uma idade superior a 35 anos, uma maior habilitação literária e um maior rendimento salarial. (50) Por outro lado, o sexo feminino, a etnia hispânica, o aluguer de habitação e a habitação em regiões rurais foram os fatores inversamente relacionados com o conhecimento sobre o radão e, conseqüentemente, com uma menor possibilidade de efetuarem os testes de quantificação de exposição ao radão residencial nos seus domicílios. (50,55) A identificação de grupos populacionais cuja sua perceção relativamente ao radão é mais reduzida e a quantidade de exposição a que estão expostos, pode ajudar a decidir e a implementar intervenções direcionadas para essas populações, de forma a aumentar a percentagem de pessoas que quantificam e tentam mitigar os níveis de radão dentro da sua casa. (36) No entanto, estudos mostram que, se a população realizasse testes de quantificação de radão residencial, a maioria não faria mitigação dos altos níveis de radão por não saber interpretar os dados ou por falta de reconhecimento do que seria um valor alto na testagem. (50,56)

Assim, é necessário disponibilizar informações fidedignas para a população geral para que se possa criar um conhecimento e uma preocupação para com este tema de maneira apropriada, sem alarmismos associados a notícias sem fundamento, estas muitas vezes associadas à comunicação social. (3,4,14,49,51,52)

Uma das formas pelas quais as informações podem chegar até às populações é através do médico de família, que é fundamental na prevenção de várias doenças. Assim, é essencial que estes profissionais de saúde adquiram conhecimento sobre o assunto, de modo a educar os seus doentes e guiá-los acerca de certas medidas preventivas. (17,57)

Segundo a União Europeia (UE), desde 2013 que todos os estados-membros devem possuir um plano de ação contra o radão, e informar a população sobre os seus níveis de radão. (14,56) Apesar disso, este tema tem recebido pouca atenção por parte dos investigadores e dos governantes. (4,5,18,49) Foram identificadas disparidades entre conhecimento sobre o radão e a quantificação do radão residencial nos vários países, sendo

que países com menores níveis de radão atmosféricos têm, por vezes, maiores taxas de proatividade da população para quantificar e mitigar do que países numa região mais propensa a níveis elevados deste gás. (9,50) Assim, torna-se imprescindível que programas de literacia para a população sejam desenvolvidos pelas autoridades competentes, para que esta esteja mais alerta e proativa, de forma a preservar melhor a sua saúde. (17,33,36,52)

No que diz respeito ao conhecimento da população portuguesa relativo ao radão, segundo um estudo apresentado por *Lopes et al.* (33), a grande maioria nunca ouviu falar sobre este gás, e aqueles que já ouviram têm um conhecimento muito limitado no que toca ao risco da sua exposição e às suas consequências. Deste modo, parece que ainda não há muita consciência relativamente aos efeitos reais da exposição ao radão, especialmente quando a exposição ocorre em ambiente interno, não relacionado à atividade mineira. Assim, verifica -se que em Portugal ainda existem poucos estudos sobre o conhecimento da população relativamente a este assunto. (33)

14. Implementação de medidas de prevenção e de mitigação

O *European Code Against Cancer*, publicado em 2015, proclama 12 princípios segundo os quais podemos prevenir a incidência de neoplasias, sendo que um deles consiste na redução da concentração de radão dentro das habitações. (3) Espaços como spas, caves e divisões mal ventiladas, residenciais ou ocupacionais, são locais especialmente propensos à acumulação de altos níveis de radão. (10,20,27)

Primeiramente, é importante distinguir as medidas de prevenção das medidas de mitigação. Ambos os termos apontam para soluções que permitem minimizar a concentração de radão no interior de edifícios, mas são aplicados em situações distintas. Desta forma, as medidas de mitigação são implementadas em edifícios já construídos, nos quais não foram executadas quaisquer medidas durante a sua fase de construção. Já as medidas de prevenção consistem nas soluções utilizadas em edifícios novos, nos quais ainda há possibilidade de implementar recursos numa fase mais precoce. (58)

A Agência de Proteção Ambiental dos EUA recomenda que todas as casas sejam testadas para a concentração de radão no seu interior. (3,27) O melhor método de medição das concentrações de radão consiste na utilização de dispositivos por um mínimo de 3 meses, utilizando coeficientes ajustados à estação do ano (sendo os níveis mais altos no inverno e menores no verão). (5,17,19,49) No entanto, a medição dos níveis de radão pode ser difícil para a população, necessitando de várias etapas. Assim, uma das maneiras mais eficientes de reduzir a concentração de radão presente nos domicílios seria a existência de

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

um detetor que sinalizasse as altas concentrações deste elemento e identificasse a necessidade de um edifício ser ventilado, dado que a ventilação parece ser o fator crucial para redução deste elemento. (15,19,20,27,59)

No que toca a medidas de mitigação, a mais frequente é a depressurização do solo. Esta consiste na construção de uma câmara subterrânea, inferiormente a um pavimento de betão, à qual serão ligados um tubo de exaustão e um ventilador, que irá depressurizar o terreno (estabelecer uma pressão inferior à atmosférica). Para além desta, também a ventilação dos espaços é frequentemente utilizada, feita não só através dos mecanismos usados nos exaustores, como também através de mecanismos manuais nomeadamente a ventilação natural conseguida através da abertura das janelas. A impermeabilização do solo com tintas e painéis também pode ser utilizada, apesar de ser menos eficaz quando implementada isoladamente. Por fim, o tratamento da água canalizada poderá, de igual forma, ser uma medida de mitigação da concentração de radão nestes edifícios. (41,58)

Claramente, a oportunidade para a implementação de medidas é mais alargada nos edifícios em construção. Assim, as medidas de prevenção englobam não só as referidas previamente, como também a construção e a instalação de membranas e barreiras especializadas, e a inserção de caixas de ar entre o solo e as estruturas. (58) Idealmente, a prevenção poderia ser feita ainda na fase de *design* dos edifícios, antes da sua construção, de modo a se conseguir implementar medidas atempadamente. (3,10,33,49,50) De facto, a OMS sugere que um sistema de mitigação ativo como a depressurização do solo, juntamente com um passivo como a colocação de uma membrana plástica no subsolo junto do piso subterrâneo, previnem a exposição ao radão em 98%. (19,60)

O melhor timing para testar e instalar sistemas de mitigação é no final do outono. Desde 2018, a UE requer que todos os estados-membros desenvolvam programas nacionais de proteção contra o radão durante construção. (15,52) Segundo a OMS, estes planos devem focar-se em identificar as áreas com uma elevada taxa de exposição ao radão e na comunicação eficaz deste risco à população. (15,18)

Apesar das vantagens, a medição e a mitigação do radão representam um elevado investimento monetário. (17,49,51) Uma forma de minimizar o impacto destes custos poderá passar pela criação de um incentivo ou pela dedução dos impostos por parte do governo para as famílias com menores rendimentos, de forma a facilitar a medição da concentração de radão e a mitigação do mesmo nas suas habitações. (17,18,50) Também deveria ser permitido que as escolas formassem os seus funcionários na medição das concentrações de radão, para que os profissionais certificados fossem chamados apenas em situações alarmantes. (18) Poderá ainda ser criado um fundo governamental dirigido a esta temática, para que sejam elaboradas e revistas as leis específicas e os regulamentos já

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

existentes em muitos países, de forma a tentar baixar a concentração deste elemento radioativo nos domicílios, mitigando assim as patologias que deste advêm. (2,50,52)

Perceber a carga de doença dos maiores problemas de saúde e o padrão de transição da mesma ao longo do tempo é crucial para o planeamento global e para a política nacional em saúde. (61) É necessária uma avaliação cuidadosa e aprofundada dos mecanismos patogénicos que existem desde a exposição até ao desenvolvimento de uma neoplasia, de modo a implementar medidas cada vez mais eficazes na sua prevenção primária. (61) A falta de programas de rastreio em populações não fumadoras pode contribuir para um estágio avançado da neoplasia pulmonar ao diagnóstico e para as baixas taxas de sobrevivência desta população. A deteção desta patologia em não fumadores não é viável, no entanto, a prevenção desta população à exposição ao radão deve ser uma prioridade de forma a reduzir a mortalidade devido a neoplasia pulmonar na população não-fumadora. (5,50,61)

Apesar do peso que a exposição ao radão tem na saúde das populações, esta ainda é muito ignorada, sendo uma área sem qualquer investimento nos programas atuais da Saúde Pública. (50)

Segundo o artigo “*Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: how many cases can be prevented if radon levels are lowered?*” de Axelsson et al, o número de casos prevenidos com a redução das concentrações de radão se estas diminuíssem de > 100 para 100 Bq/m³ seriam evitados de 183 casos (39%); de > 100 para 69 Bq/m³ seriam evitados 225 casos (48%) e de > 200 para 140 Bq/m³, 131 casos poderiam ser prevenidos (28%). Reforça-se que a análise tomou como garantida uma manutenção da incidência do cancro do pulmão ao longo do tempo. Não obstante, sabemos que mudanças nos hábitos tabágicos levariam a uma diminuição desta incidência, fazendo com que o número de casos prevenidos de cancro do pulmão (relacionados com a exposição ao radão) fosse menor do que segundo os cálculos feitos neste estudo. Por isso, é importante analisar estes dados com espírito crítico, porque diversas variáveis não são constantes ao longo do tempo, como a incidência de cancro, ou as características da população. (20)

Verificou-se ainda que 25 a 30% dos casos de cancro do pulmão atribuíveis ao radão poderiam ser prevenidos se as concentrações *indoor* de radão passassem de 200 para 140 Bq/m³; e 35 a 40% se diminuíssem para 100 Bq/m³. (20)

Os testes disponíveis para quantificar os níveis de radão no interior dos domicílios são também extremamente complicados, necessitando de várias etapas, algumas delas de difícil acesso, sendo por isso baixo o número de pessoas que fazem a testagem nas suas casas. Uma das maneiras mais eficientes de reduzir a concentração de radão presente nos domicílios seria a existência de um detetor que sinalizasse as altas concentrações deste elemento e assinalasse um aumento da necessidade de uma melhor ventilação do edifício.

O Impacto do Radão na Saúde Humana e a sua Prevenção e Mitigação

No entanto, é necessário que o desenvolvimento tecnológico se debruce mais sobre esta área e que toda a população tenha conhecimento acerca deste risco de saúde modificável. (49)

O estudo do impacto do radão na saúde humana engloba vários aspetos, desde a avaliação do risco, a técnicas de mitigação da concentração deste dentro de edifícios, avaliando também os fatores que possam alterar a sua concentração, as técnicas de medição e a definição de regulamentos. Cada um destes aspetos requer uma enorme complexidade, dada a multiplicidade de fontes que podem alterar estas variáveis. É também importante salientar que a falta de programas de rastreio nas populações não fumadoras pode contribuir para o estágio avançado desta patologia ao diagnóstico e para as baixas taxas de sobrevivência nas mesmas.

Nas figuras abaixo apresentam-se os exemplos das medidas ativas e passivas úteis para a redução da concentração de radão no interior dos edifícios.

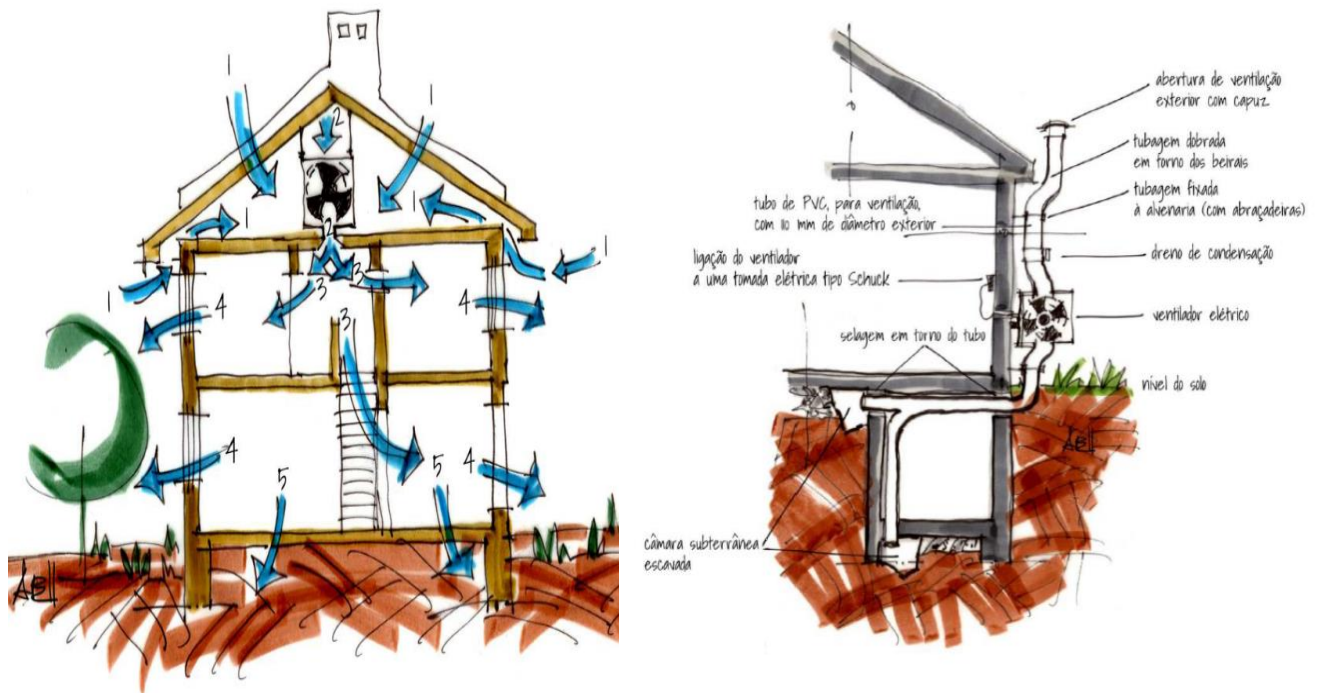


Figura 8 - Exemplos de medidas ativas. [imagem obtida na internet]. 2021 (22)

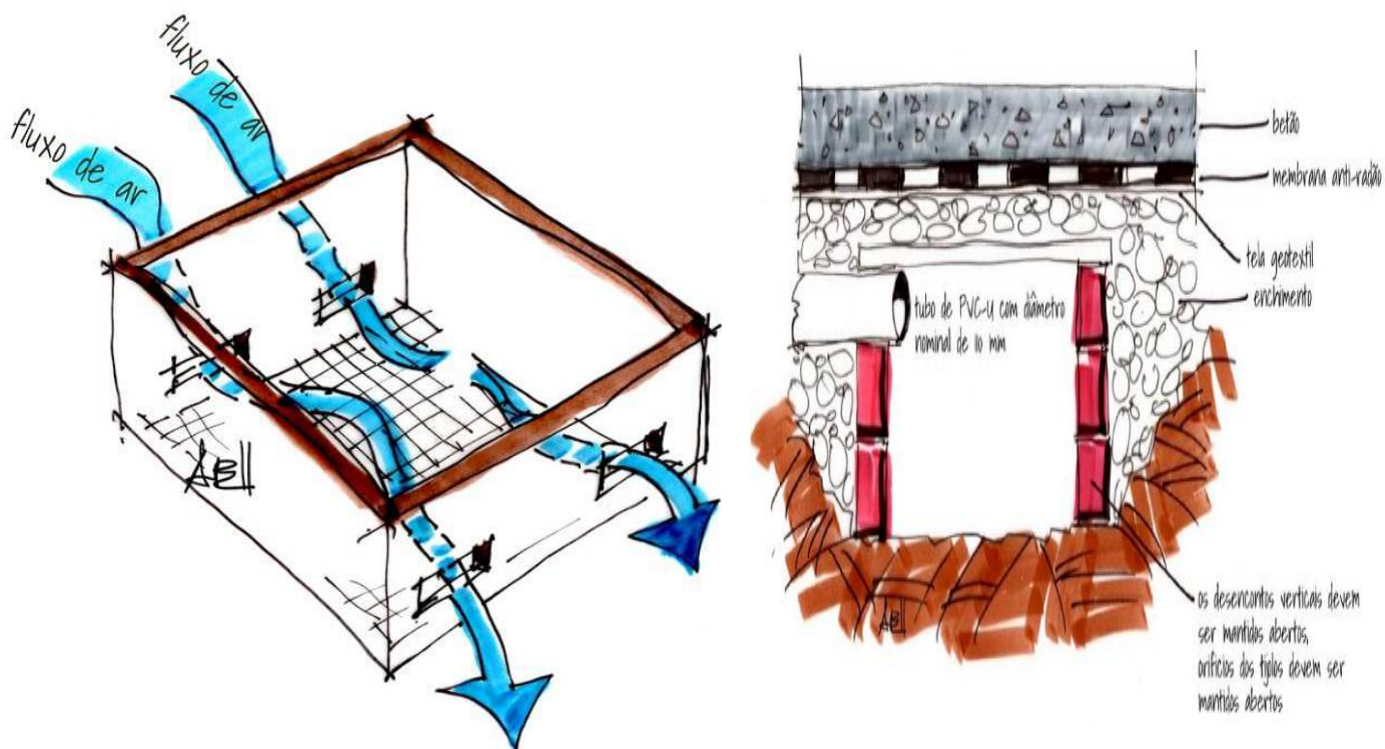


Figura 9 - Exemplo de medidas passivas. [imagem obtida na Internet]. 2021 (62)

15. Conclusão

O radão é um importante problema de saúde pública, sendo a principal causa da neoplasia do pulmão nos não fumadores. No entanto, é pouco conhecido pelas populações, mesmo por aquelas que apresentam um risco mais elevado de exposição. Deste modo, é necessário: educar e sensibilizar a população para este problema de saúde pública; regulamentar a avaliação sistemática do risco da sua exposição em zonas geográficas com maior concentração; avaliar através de estudos epidemiológicos a exposição das populações a este gás; implementar medidas de prevenção e de mitigação e programas de saúde pública que promovam a redução do radão dentro dos edifícios, na tentativa de diminuir o risco da sua exposição e o impacto negativo na saúde humana associados a este elemento radioativo.

Especificamente para a prevenção primária da neoplasia pulmonar, devem ser implementadas e incentivadas as políticas de controlo do tabagismo ou da cessação tabágica, especialmente em regiões com alta concentração de radão doméstico, dado que o principal fator de risco é o tabagismo (pelo seu comportamento sinérgico com a exposição ao radão). Seria igualmente importante estabelecer como limite para o radão doméstico uma quantidade inferior à estabelecida pelas autoridades, passando de 148 para 100Bq/m³, podendo esta ser uma medida implementada para diminuir a taxa de mortalidade da população.

O estudo do impacto do radão na saúde humana engloba vários aspetos, desde avaliação do risco, a técnicas de mitigação da concentração deste dentro dos edifícios, avaliando também fatores que possam alterar a sua concentração, implementando técnicas de medição e definindo regulamentos específicos. Cada um destes aspetos requer uma enorme complexidade, dada a diversidade de fontes que podem alterar estas variáveis. São também necessários mais estudos sobre a combinação da exposição ao radão e a outros carcinogéneos, sendo também importante avaliar o impacto que a suscetibilidade pessoal tem na exposição ao radão.

16. Referências bibliográficas

1. Cheng ES, Egger S, Hughes S, Weber M, Steinberg J, Rahman B, et al. Systematic review and meta-analysis of residential radon and lung cancer in never-smokers. Vol. 30, *European Respiratory Review*. European Respiratory Society; 2021. p. 1–14.
2. Mozzoni P, Pinelli S, Corradi M, Ranzieri S, Cavallo D, Poli D. Environmental/occupational exposure to radon and non-pulmonary neoplasm risk: A review of epidemiologic evidence. Vol. 18, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI; 2021.
3. Grzywa-Celińska A, Krusiński A, Mazur J, Szewczyk K, Kozak K. Radon—the element of risk. The impact of radon exposure on human health. *Toxics*. 2020 Dec 1;8(4):1–20.
4. Kang JK, Seo S, Jin YW. Health effects of radon exposure. Vol. 60, *Yonsei Medical Journal*. Yonsei University College of Medicine; 2019. p. 597–603.
5. Riudavets M, Garcia de Herreros M, Besse B, Mezquita L. Radon and Lung Cancer: Current Trends and Future Perspectives. Vol. 14, *Cancers*. MDPI; 2022.
6. Vienneau D, Boz S, Forlin L, Flückiger B, de Hoogh K, Berlin C, et al. Residential radon – Comparative analysis of exposure models in Switzerland. *Environ Pollut*. 2021;271.
7. Petermann E, Bossew P. Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;780:146601. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146601>
8. Zarnke AM, Tharmalingam S, Boreham DR, Brooks AL. BEIR VI radon: The rest of the story. Vol. 301, *Chemico-Biological Interactions*. Elsevier Ireland Ltd; 2019. p. 81–7.
9. Lorenzo-González M, Torres-Durán M, Barbosa-Lorenzo R, Provencio-Pulla M, Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A. Radon exposure: a major cause of lung cancer. Vol. 13, *Expert Review of Respiratory Medicine*. Taylor and Francis Ltd.; 2019. p. 839–50.
10. Tchorz-Trzeciakiewicz DE, Kłós M. Factors affecting atmospheric radon concentration, human health. *Sci Total Environ*. 2017;584–585:911–20.

11. Sheen S, Lee KS, Chung WY, Nam S, Kang DR. An updated review of case-control studies of lung cancer and indoor radon-Is indoor radon the risk factor for lung cancer? Vol. 28, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. BioMed Central Ltd.; 2016.
12. Kwan WS, Nikezic D, Roy VAL, Yu KN. Multiple stressor effects of radon and phthalates in children: Background information and future research. Vol. 17, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI AG; 2020.
13. Mukharesh L, Greco KF, Banzon T, Koutrakis P, Li L, Hauptman M, et al. Environmental radon and childhood asthma. *Pediatr Pulmonol*. 2022;57(12):3165–8.
14. Pantelić G, Čeliković I, Živanović M, Vukanac I, Nikolić JK, Cinelli G, et al. Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe. Vol. 204, *Journal of Environmental Radioactivity*. Elsevier Ltd; 2019. p. 163–74.
15. Fuente M, Long S, Fenton D, Hung LC, Goggins J, Foley M. Review of recent radon research in Ireland, OPTI-SDS project and its impact on the National Radon Control Strategy. Vol. 163, *Applied Radiation and Isotopes*. Elsevier Ltd; 2020.
16. Chege M, Hashim N, Nyambura C, Mustapha A, Hosada M, Tokonami S. Radon and thoron; Radioactive gases lurking in earthen houses in rural Kenya. Vol. 7, *Frontiers in Public Health*. Frontiers Media S.A.; 2019.
17. Radon gas—the hidden killer. *Clin Rev* . 2018;64:1–6.
18. Gordon K, Terry PD, Liu X, Harris T, Vowell D, Yard B, et al. Radon in schools: A brief review of state laws and regulations in the United States. Vol. 15, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI AG; 2018.
19. Khan SM, Gomes J, Krewski DR. Radon interventions around the globe: A systematic review. Vol. 5, *Heliyon*. Elsevier Ltd; 2019.
20. Axelsson G, Andersson EM, Barregard L. Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: how many cases can be prevented if radon levels are lowered? *Cancer Causes Control*. 2015;26(4):541–7.
21. Daniels RD, Schubauer-Berigan MK. Radon in US workplaces: A review. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017 Nov 1;176(3):278–86.
22. Available from: PowerPoint Presentation (apambiente.pt). Percentagem da dose

- anual recebida pela população mundial [image on the Internet]. [updated 2023 Feb 18; cited 2023 Mar 14]. 2021.
23. Oh SS, Koh S, Kang H, Lee J. Radon exposure and lung cancer: Risk in nonsmokers among cohort studies. Vol. 28, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. BioMed Central Ltd.; 2016.
 24. Laurier D, Marsh JW, Rage E, Tomasek L. Miner studies and radiological protection against radon. 2019.
 25. Yoon JY, Lee JD, Joo SW, Kang DR. Indoor radon exposure and lung cancer: A review of ecological studies. Vol. 28, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. BioMed Central Ltd.; 2016.
 26. Gruber V, Baumann S, Wurm G, Ringer W, Alber O. The new Austrian indoor radon survey (ÖNRAP 2, 2013–2019): Design, implementation, results. *J Environ Radioact* [Internet]. 2021;233(March):106618. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106618>
 27. Vogiannis EG, Nikolopoulos D. Radon sources and associated risk in terms of exposure and dose. Vol. 2, *Frontiers in Public Health*. Frontiers Media S. A; 2015.
 28. Available from: [Medição de radão | Agência Portuguesa do Ambiente \(apambiente.pt\)](https://apambiente.pt). Exemplo das variações sazonais das concentrações de radão e das variações diurnas. [image on the Internet]. [updated 2023 Feb 22; cited 2023 Mar 20]. 2021.
 29. Bossew P, Cinelli G, Ciotoli G, Crowley QG, de Cort M, Medina JE, et al. Development of a geogenic radon hazard index—concept, history, experiences. Vol. 17, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI AG; 2020. p. 1–24.
 30. Available from: <https://apambiente.pt/radao>. Informações relativas ao radão. [Internet]. [updated 2023 Feb 01; cited 2023 Mar 08]. 2021.
 31. Available from: [Mapa de suscetibilidade ao radão | Agência Portuguesa do Ambiente \(apambiente.pt\)](https://apambiente.pt) e [MAPA de RADÃO de Portugal | Lusoradon](https://lusoradon.pt). Mapa de suscetibilidade ao radão. [image on the Internet]. [updated 2023 Feb 26; cited 2023 Mar 28]. 2005; 2022.
 32. European Commission. Radioactivity Environmental Monitoring [Internet]. Available from: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration>

33. Nunes LJR, Curado A, da Graça LCC, Soares S, Lopes SI. Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies. Vol. 19, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI; 2022.
34. Ajrouche R, Ielsch G, Cléro E, Roudier C, Gay D, Guillevic J, et al. Quantitative Health Risk Assessment of Indoor Radon: A Systematic Review. Vol. 177, *Radiation Protection Dosimetry*. Oxford University Press; 2017. p. 69–77.
35. Chen J. RISK ASSESSMENT for RADON EXPOSURE in VARIOUS INDOOR ENVIRONMENTS. *Radiat Prot Dosimetry*. 2019 Nov 1;185(2):143–50.
36. Ali MYM, Hanafiah MM, Khan MF. Potential factors that impact the radon level and the prediction of ambient dose equivalent rates of indoor microenvironments. *Sci Total Environ*. 2018;626:1–10.
37. Available from: IARC Publications Website-Radiation. Evaluation of Carcinogenic Risks [Internet]. [updated 2023 Feb 01; cited 2023 Mar 20]. 2012.
38. Available from: Prevenção e remediação | Agência Portuguesa do Ambiente (apambiente.pt). Esquema das vias de entrada do radão para o interior de edifícios. [image on the Internet]. [updated 2023 Feb 05; cited 2023 Mar 15]. 2021.
39. Ajrouche R, Ielsch G, Cléro E, Roudier C, Gay D, Guillevic J, et al. Quantitative Health Risk Assessment of Indoor Radon: A Systematic Review. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017;177(1–2):69–77.
40. Soldati G, Ciaccio MG, Piersanti A, Cannelli V, Galli G. Active Monitoring of Residential Radon in Rome: A Pilot Study. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(21).
41. Real LEP, Lopes JMG, Viegas JC, Coelho AB, Oliveira HDL. Guia para mitigação da admissão de radão para o interior de edifícios existentes. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente; 2020 Dez. 153 p. 2020.
42. Maier A, Wiedemann J, Rapp F, Papenfuß F, Rödel F, Hehlhans S, et al. Molecular Sciences Radon Exposure-Therapeutic Effect and Cancer Risk. *Mol Sci* [Internet]. 2021;22(316):1–39. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijms22010316>
43. Hubaux R, Becker-Santos DD, Enfield KS, Lam S, Lam WL, Martinez VD. Arsenic, asbestos and radon: Emerging players in lung tumorigenesis. Vol. 11, *Environmental Health: A Global Access Science Source*. 2012.

44. Torres-Durán M, Ruano-Ravina A, Parente-Lamelas I, Leiro-Fernández V, Abal-Arca J, Montero-Martínez C, et al. Residential radon and lung cancer characteristics in never smokers. *Int J Radiat Biol.* 2015 Aug 3;91(8):605–10.
45. Choi H, Mazzone P. Radon and lung cancer: Assessing and mitigating the risk. Vol. 81, *Cleveland Clinic Journal of Medicine.* Cleveland Clinic Educational Foundation; 2014. p. 567–75.
46. CHEN B, YUAN TW, WANG AQ, ZHANG H, FANG LJ, WU QQ, et al. Exposure to Radon and Kidney Cancer: A Systematic Review and Meta-analysis of Observational Epidemiological Studies. *Biomed Environ Sci.* 2018 Nov 1;31(11):805–15.
47. Lu L, Zhang Y, Chen C, Field RW, Kahe K. Radon exposure and risk of cerebrovascular disease: a systematic review and meta-analysis in occupational and general population studies. Vol. 29, *Environmental Science and Pollution Research.* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2022. p. 45031–43.
48. Vogeltanz-Holm N, Schwartz GG. Radon and lung cancer: What does the public really know? Vol. 192, *Journal of Environmental Radioactivity.* Elsevier Ltd; 2018. p. 26–31.
49. Ou JY, Ramsay JM, Smith J, Akerley W, Martel L, Harding G, et al. Public awareness and perceptions surrounding radon testing in a state with high radon emission potential and low smoking rates. *J Environ Health.* 2019;82(3):8–17.
50. Gordon K, Terry PD, Liu X, Harris T, Vowell D, Yard B, et al. Radon in schools: A brief review of state laws and regulations in the United States. Vol. 15, *International Journal of Environmental Research and Public Health.* MDPI; 2018.
51. Martell M, Perko T, Tomkiv Y, Long S, Dowdall A, Kenens J. Evaluation of citizen science contributions to radon research. *J Environ Radioact.* 2021 Oct 1;237.
52. Cori L, Curzio O, Donzelli G, Bustaffa E, Bianchi F. A Systematic Review of Radon Risk Perception, Awareness, and Knowledge: Risk Communication Options. *Sustain.* 2022;14(17):1–27.
53. Cronin C, Trush M, Bellamy W, Russell J, Locke P. An examination of radon awareness, risk communication, and radon risk reduction in a Hispanic community. *Int J Radiat Biol.* 2020;96(6):803–13.
54. Neri A, McNaughton C, Momin B, Puckett M, Gallaway MS. Measuring public knowledge, attitudes, and behaviors related to radon to inform cancer control

- activities and practices. *Indoor Air*. 2018;28(4):604–10.
55. Poortinga W, Bronstering K, Lannon S. Awareness and perceptions of the risks of exposure to indoor radon: A population-based approach to evaluate a radon awareness and testing campaign in England and Wales. *Risk Anal*. 2011;31(11):1800–12.
 56. Schmitz D, Klug MG, Schwartz GG. Radon knowledge and practices among family physicians in a high radon state. *J Am Board Fam Med*. 2021;34(3):602–7.
 57. Organization WH. WHO Handbook on Indoor Radon : a Public Health Perspective. World Health Organization; 2009. 110 p.
 58. Štekl I, Hůlka J, Mamedov F, Fojtík P, Čermáková E, Jílek K, et al. Low Radon Cleanroom for Underground Laboratories. *Front Public Heal*. 2021;8(February):1–8.
 59. Kim SH, Hwang WJ, Cho JS, Kang DR. Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure. Vol. 28, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. BioMed Central Ltd.; 2016.
 60. Noh J, Sohn J, Cho J, Kang DR, Joo S, Kim C, et al. Residential radon and environmental burden of disease among Non-smokers. Vol. 28, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. BioMed Central Ltd.; 2016.
 61. Available from: Prevenção e remediação | Agência Portuguesa do Ambiente (apambiente.pt). Exemplos de medidas passivas para a redução da concentração de radão. [image on the Internet]. [updated 2023 Feb 24; cited 2023 Apr 14]. 2021.