

# Avaliação dos Níveis de Radônio em Ambientes Fechados no Brasil: uma visão geral

## Assessment of Indoor Radon Levels in Brazil: an overview

Camila Rodrigues e Silva,<sup>a</sup> Daniela Vasconcelos<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Química. Outeiro CEP 24020-141, Niterói-RJ, Brasil.

<sup>b</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Cidade Universitária, CEP 21941-916, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

\*E-mail: [camilae@id.uff.br](mailto:camilae@id.uff.br)

Recebido em: 27 de Novembro de 2020

Aceito em: 27 de Maio de 2021

Publicado online: 10 de Novembro de 2021

Radon is a naturally occurring, tasteless, odorless and colorless radioactive gas at room temperature, it can diffuse into the environment through soil, water (mineral or thermal or groundwater) and buildings. In poorly ventilated environments, such as homes, it can accumulate at levels that are harmful to humans and therefore pose risks to public health. In Brazil, research involving indoor radon dates back to the late 1980s. There is still no specific legislation for radon, but the Ministry of Health recommends an alpha radiation limit value of 0.1 Bq m<sup>-3</sup> and 1.0 Bq m<sup>-3</sup> for beta radiation. The present study aimed to explore the state of the art of research on natural radioactivity resulting from radon in Brazil through a survey of articles published in the Scopus database. A total of 67 research articles were considered for this purpose.

**Keywords:** Environmental radioactivity; indoor radon; effective annual dose; public health

## 1. Introdução

O homem e o meio ambiente ao seu entorno estão continuamente expostos à radiação ionizante proveniente de fontes naturais e artificiais, o que lhes conferem certa tolerância a certos níveis de atividade, sem consequências prejudiciais.<sup>1</sup> De acordo com o Conselho Nacional de Proteção e Medição de Radiação (NCRP), a radiação natural contribui com aproximadamente 82% de toda a radiação ionizante a qual a população está exposta, sendo que, 55% desta é proveniente do radônio. As fontes artificiais, como os raios-X médicos, a medicina e indústrias nucleares se resumem a 18% de contribuição.<sup>2,3</sup>

A radioatividade natural é devida principalmente à radiação cósmica, radiação cosmogênica e a radiação proveniente dos elementos radioativos. Essa consiste de prótons de alta energia, partículas alfas e núcleos atômicos pesados. Já a radiação cosmogênica é oriunda dos radioisótopos formados na atmosfera terrestre. A radiação proveniente dos elementos radioativos, por sua vez, corresponde a radiação existentes na crosta terrestre desde a sua origem a 4,5 bilhões de anos, a partir dos radionuclídeos primordiais, destes, os mais importantes são os isótopos de urânio (<sup>238</sup>U e <sup>235</sup>U), tório (<sup>232</sup>Th) e o potássio (<sup>40</sup>K),<sup>1,4</sup> os quais, com exceção do <sup>40</sup>K, dão origem a três grandes séries naturais de decaimento, como mostrado na Figura 1, nas quais há a presença de isótopos radioativos de meia-vida suficientemente longa que permitem que haja a radioatividade destes até os dias atuais.

O radônio (<sup>222</sup>Rn) é um gás nobre radioativo natural, produto de decaimento do <sup>226</sup>Ra, contido na série do <sup>238</sup>U, e um conhecido carcinógeno humano que pode emanar de rochas e solos e tende a se concentrar em espaços fechados e mal ventilados, como minas subterrâneas ou edifícios.<sup>6</sup> O gás pode se difundir para o interior de construções por meio de rachaduras em pisos e paredes, juntas de edifícios, vãos em pisos suspensos, dutos de água e gás e, em menor extensão, por meio de poços, ficando retido nesses ambientes e podendo se acumular a níveis elevados, representando, assim, um risco à saúde da população.<sup>6,7,8</sup>

A partir do decaimento dos isótopos de rádio, <sup>226</sup>Ra, <sup>224</sup>Ra e <sup>223</sup>Ra, são formados, respectivamente, os isótopos radioativos de: radônio (<sup>222</sup>Rn), de meia-vida de 3,82 dias, torônio (<sup>220</sup>Rn), de meia-vida de 55,6 segundos e actinônio (<sup>219</sup>Rn) de meia-vida de 3,96 segundos. Todos eles desintegram-se emitindo partículas alfa, produzindo isótopos do elemento polônio (Po), que por sua vez, decaem até originar os isótopos estáveis de chumbo (Pb).<sup>9</sup> Os isótopos de radônio são os únicos elementos gasosos nas séries de decaimento do urânio e tório, dessa forma a dinâmica e comportamento desses elementos é diferente dos demais isótopos.

De acordo com a EPA, a concentração de radônio nas residências é um dos agentes cancerígenos mais graves aos quais o público pode estar exposto. Os produtos do decaimento do radônio, <sup>218</sup>Po e <sup>214</sup>Po, emitem partículas alfa que, quando inaladas, irradiam o trato respiratório

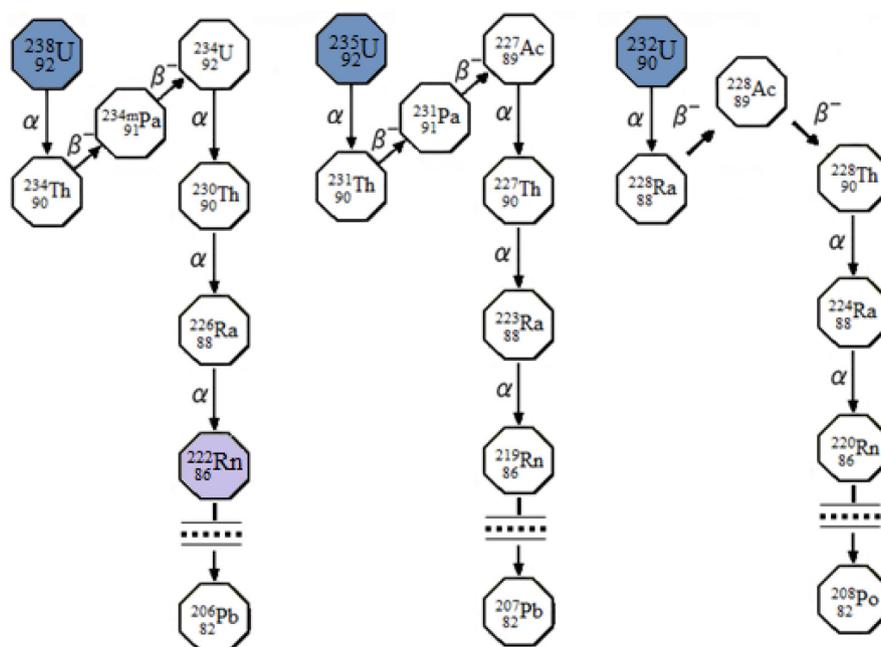


Figura 1. Séries de decaimento dos radionuclídeos primordiais. Adaptado de UNSCEAR, 2017<sup>5</sup>

e promovem a carcinogênese.<sup>10</sup> A Organização Mundial da Saúde estima que o radônio pode contribuir com 14% da incidência de câncer de pulmão a cada ano, valor que pode variar de acordo com a média nacional de concentração do elemento e a prevalência do tabagismo.<sup>6</sup> Tal doença é uma das neoplasias malignas mais comuns e uma das principais causas de mortes evitáveis em todo o mundo, com tendência a aumentar a incidência mundial em 2% ao ano.<sup>11</sup> Uma estimativa mundial em 2018 mostrou que dos 18 milhões de novos casos de câncer, 2,1 milhões (aproximadamente 11%) correspondiam ao câncer de pulmão.<sup>12-14</sup>

Além do câncer pulmonar, estudos atribuíram a exposição ao radônio ao desenvolvimento frequentemente tardio de algumas condições neurodegenerativas, como doenças de Alzheimer e Parkinson, doença do neurônio motor e esclerose múltipla.<sup>15-18</sup>

As concentrações de radônio em ambientes fechados não são uniformes, variando de acordo com diversos fatores ambientais, como a geologia das áreas sobre as quais os edifícios são construídos, o relevo, propriedades físicas dos solos (como permeabilidade e umidade e tipo de solo), parâmetros meteorológicos da região, e fatores culturais, como os materiais de construção empregados, as práticas de ventilação e construção e o estilo de vida hábitos dos ocupantes, nos casos das residências.<sup>8,19-26</sup>

Muitos países e organizações internacionais têm desenvolvido programas que visam monitorar e mitigar a exposição da população em regiões com alta radiação natural de fundo. Por exemplo, mapas locais e nacionais de potencial de radônio têm sido construídos com base em dados geológicos, pedológicos e radiométricos, a fim de contribuir com órgãos governamentais e ajudar no direcionamento de recursos e implementação de diretrizes que busquem a mitigação das áreas, facilitando a gestão de

riscos à saúde em áreas onde há altos níveis de radioatividade ambiental.<sup>10,24,27-35</sup>

Por outro lado, em muitos países em desenvolvimento como os da América do Sul, as políticas sobre regulamentação, controle e/ou mitigação de fontes de radiação ionizante natural ainda são incipientes.<sup>36,37</sup> No Brasil, cujo território é rico em urânio e tório, detentor da sétima maior reserva mundial, a literatura científica relacionada a esse assunto ainda é escassa, além de não haver uma legislação específica que regule os níveis de radônio de residências no território brasileiro. É estabelecido no país um limite máximo de exposição dos indivíduos a radionuclídeos em geral em conformidade com os padrões internacionais da OMS e ICRP.<sup>38-40</sup>

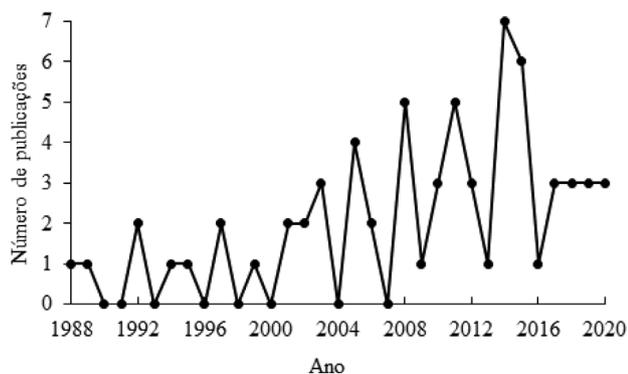
Não há nível seguro conhecido de radônio. À medida que a exposição ao radônio aumenta, aumenta também o risco de desenvolver alguma neoplasia. Atualmente, o limite de dose anual é de 1,0 mSv a<sup>-1</sup>. Em termos de concentração, equivale a níveis de radônio no ar de 300 Bq m<sup>-3</sup>, no entanto, é recomendado que as concentrações em ambientes fechados não excedam 100 Bq m<sup>-3</sup>.<sup>6,40,41</sup>

No Brasil, os estudos sobre os impactos da radioatividade ambiental na saúde humana, com enfoque no gás radônio, ainda são poucos e esparsos. Isso ocorre porque tradicionalmente o acúmulo de radônio em ambientes internos no país não tem sido considerado um grande problema, visto que o clima tropical permite altas taxas de ventilação. Além disso, os estilos de construção associados aos hábitos da população podem contribuir para a diluição do gás nos ambientes. No entanto, pesquisas pontuais, como serão mostradas nesse estudo, mostram que esse cenário não é necessariamente correto, afinal cidades localizadas nos estados de Minas Gerais e Rio Grande do Norte, por exemplo, apresentaram elevadas concentrações de radônio interno.<sup>7,19,20,25,34</sup>

Deste modo, esta pesquisa teve como objetivo fazer um levantamento dos estudos nacionais existentes sobre a exposição ao radônio em ambientes fechados, a fim de investigar quantitativamente a produção científica nos últimos 30 anos, sintetizar os principais métodos de determinação de radônio, e avaliar os níveis de radioatividade decorrente desse gás e seus riscos à saúde humana através dos cálculos de dose.

## 2. Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi conduzido pesquisando pelos tópicos “indoor radon” e “radon” no Scopus, o maior banco de dados de resumos e citações da literatura revisada por pares. Os resultados de pesquisa sobre o tema de interesse, que incluíram artigos, artigos de revisão e de congressos, livros e editoriais, foram limitados aos produzidos no Brasil e aqueles cujo assunto se referia ao monitoramento dos níveis do gás radônio em ambientes fechados, como residências, prédios públicos e comerciais, assim como outros locais de trabalho, foram obtidos 67 resultados distribuídos nos últimos trinta e dois anos, como mostrado na Figura 2.



**Figura 2.** Evolução da produção bibliográfica brasileira sobre a determinação de radônio em residências e outras edificações. Fonte: Elaborado pelas autoras.

Os estudos sobre os níveis de radônio e suas implicações ambientais têm crescido ao longo dos anos, no entanto,

o país ainda apresenta um baixo número de publicações na área. Além disso, dos estudos encontrados, a maioria se concentra na região sudeste do Brasil, 73,1%, com destaque para o estado de São Paulo (41,8%), mostrando uma necessidade de maiores investigações ao longo do território brasileiro.

As regiões Sul e Nordeste do país apresentaram o mesmo número de publicações, representando 11,9% dos artigos incluídos nesta revisão. Por fim, as regiões Norte e Centro-Oeste foram as menos estudadas, apresentando 1,5% dos artigos relacionados a determinação de radônio em ambientes fechados.

## 3. Metodologias Analíticas para a Determinação de Radônio

Muitas técnicas e instrumentos de detecção estão disponíveis, sejam elas para a medição direta do radônio sejam para a detecção de seus isótopos filhos, e cada técnica apresenta suas vantagens e desvantagens para diferentes situações,<sup>42,43</sup> na Tabela 1 estão sintetizados os principais métodos de análise e em seguida há uma breve descrição de cada um deles.

Os detectores específicos de radônio podem ser divididos em dois grandes grupos: passivos e ativos. Dispositivos passivos não requerem energia elétrica e geralmente o radônio ou seus produtos de decaimento se aderem a eles e posteriormente serão analisados em um laboratório. Detectores passivos incluem detector de carvão ativado, detector de traços de partículas alfa e câmara de ionização de eletreto.<sup>43,44</sup>

Detectores ativos, por outro lado, requerem energia elétrica para funcionamento e incluem monitoramentos contínuos de radônio ou de seus isótopos filhos, geralmente são mais caros, que os detectores passivos mas permitem um registro das flutuações da concentração do gás durante o período de amostragem. Detectores de integração eletrônica e monitor contínuo de radônio são exemplos desse tipo de detector.<sup>6,43,44</sup>

A aparelhagem mais adequada deve ser escolhida com base no tipo de amostragem que se quer realizar e o objetivo

**Tabela 1.** Características das principais metodologias analíticas de determinação de radônio<sup>44</sup>

Tipo de detector	Método	Período de amostragem	Custo
Detector de traços de partículas alfas	Passivo	Curto a médio 1 – 12 meses	Baixo
Detector de carvão ativado	Passivo	Curto 2 – 7 dias	Baixo
Câmara de ionização de eletreto	Passivo	Curto a médio 5 dias – 1 ano	Médio
Detector de integração eletrônica	Ativo	Longo 2 dias- ano(s)	Médio
Monitor contínuo de radônio	Ativo	Longo 1 hora – ano(s)	Alto

Fonte: Elaborada pelas autoras

do estudo. Para análises preliminares dos níveis de radônio em um ambiente, de curta duração, seja de poucas horas até poucos dias, detectores como o monitor contínuo de radônio, a câmara de ionização de eletreto e detector de carvão ativado, são os mais adequados. Já para uma avaliação da exposição a radioatividade em que se é necessária a integração temporal pode-se empregar os detectores de traços de partículas alfas, o detector de integração eletrônica, bem como a câmara de ionização de eletreto e o monitor contínuo de radônio.<sup>6,44</sup>

Em estudos brasileiros se destacam a utilização de detectores passivos, como os detectores de traços para partícula alfa (ou detectores nucleares de estado sólido - SSNTD) CR-39,<sup>45-51</sup> LR-115,<sup>51-53</sup> Lexan,<sup>54-56</sup> Makrofol,<sup>57-60</sup> e câmara de ionização de eletreto.<sup>61,62</sup> Detectores ativos também são empregados, mas em menor proporção, como o monitor contínuo de radônio RAD7.<sup>31,63,64</sup>

### 3.1. Detector de traços para partícula alfa

Os detectores de traços são materiais plásticos, fabricados para registrar os traços de partículas alfa do radônio e seus produtos de decaimento, envolvidos por uma câmara de difusão e por um filtro, cuja finalidade é impedir a entrada dos isótopos filhos do radônio na câmara de difusão.<sup>6,42,44</sup> Os plásticos dos detectores mais comuns desse tipo são compostos por Polialil Digligol Carbonato (CR-39), nitrato de celulose (LR-115) ou policarbonato (Makrofol).

A radiação alfa emitida no decaimento do radônio atinge o detector resultando no aparecimento de traços latentes, espécies de danos microscópicos na superfície do plástico. Essa impressão pode ser revelada mais tarde com a aplicação de uma solução de NaOH ou KOH, às vezes suplementada com etanol e posteriormente observada por microscopia ótica.<sup>42,44</sup> Com a contagem dos traços, seja manual ou automatizada, e aplicação dos fatores de correção permite a determinação da concentração de radônio.<sup>44</sup>

Detectores desse tipo apresentam relativo baixo custo, permitem períodos amostrais de até um ano, no entanto, são insensíveis a variação de umidade, temperatura e outros tipos de radiações de fundo. São uma escolha popular para análises domésticas, como observado nos programas de conscientização estadunidenses.<sup>44,65</sup>

### 3.2. Detectores de adsorção de carvão ativado

Os detectores geralmente compreendem uma camada de carvão ativado mantido em posição por uma malha de metal em um recipiente de metal com uma tampa removível. O carvão ativado tem afinidade com muitos gases, incluindo o radônio, portanto, antes de ser usado, o recipiente aberto é aquecido para remover qualquer gás adsorvido e vapor de água. A tampa é então fixada com fita adesiva e o recipiente movido para o local de medição onde a tampa é removida, expondo o carvão. No final do período de amostragem, a

tampa é recolocada e fechada e o recipiente é enviado a um laboratório para análise.<sup>42,44</sup> A partir daí as partículas radioativas emitidas pelo carvão podem ser contadas diretamente por contador gama ou o carvão pode ser misturado com um coquetel de cintilação líquido, no qual o radônio se dissolve rapidamente, e esse líquido é contado em um detector de cintilação.<sup>42-44</sup>

O princípio dessa técnica é baseado na adsorção e dessorção do radônio nos sítios ativos do carvão ativado.<sup>44</sup> Dessa forma, esse tipo de detector não é um integrador verdadeiro, já que o radônio inicialmente adsorvido irá decair e parcialmente se dessorver do carvão durante a exposição. As amostragens são realizadas por um período de 2 a 7 dias, uma vez que a meia-vida de 3,82 dias do radônio e sua dessorção do carvão tornam as medições mais longas impraticáveis. Apesar dos detectores de carvão fazerem medições precisas das concentrações de radônio, a umidade e temperatura dos ambientes influenciam significativamente nos resultados encontrados, sendo necessária a calibração dos equipamentos para cada tipo de ambiente. Além disso, não representam as variações temporais a médio e longo prazo dos níveis de radônio encontradas nos ambientes, não refletindo verdadeiramente o meio.<sup>42-44</sup>

### 3.3. Câmaras de ionização de eletretos

Os detectores de íons consistem em um disco de teflon carregado eletricamente (eletreto) disposto no interior de uma câmara condutora de eletricidade. Por difusão, o gás radônio, que passa por um filtro e entra na câmara de ionização, ao decair. A radiação alfa emitida ioniza o ar presente. Os íons negativos gerados são recolhidos pelo eletreto positivo da câmara e a carga elétrica é reduzida, tal descarga é aferida por meio de um leitor de eletreto a bateria. Em laboratório, o nível de radônio é calculado com base na redução da carga do eletreto em um determinado período de tempo, portanto são necessárias para essa análise somente as leituras iniciais e finais do eletreto e o tempo de exposição da câmara.<sup>43,44,66</sup>

O desempenho desse tipo de detector é regido por três princípios fundamentais, que são: (1) nenhum outro processo na câmara pode causar a mudança de carga na superfície do eletreto; (2) a mudança de carga no eletreto após a exposição é permanente; (3) a aferição da carga é medida através de um método não destrutivo.<sup>66</sup>

As variações no projeto das câmaras de eletreto determinam se os detectores são apropriados para fazer medições de longo ou curto prazo. Apesar de um detector desse tipo fornecer resultados de concentração de radônio precisos em análises preliminares de curto prazo, é indicada a utilização simultânea de duas câmaras de ionização de eletretos ao se realizar monitoramentos de longo prazo dos níveis de radônio. Isso se deve devido a possibilidade de problemas de funcionamento decorrentes de má utilização, e levando em conta o tempo longo de amostragem, a reanálise seria um sério contratempo.<sup>67</sup>

Uma das desvantagens desse tipo de detector é o fato dele ser sensível à radiação gama de fundo, tornando necessária a aplicação de uma correção. O background da radioatividade ambiental gama pode ser determinado com o auxílio de um dosímetro e por ser variável de uma região a outra o fator de correção que deve ser aplicado não é único.<sup>67</sup>

### 3.4. Detectores de integração eletrônica

Os detectores de integração eletrônica são constituídos por uma câmara de difusão de pequena dimensão com um detector de silício de estado sólido em seu interior. Nesse tipo de equipamento há a contagem das partículas alfas emitidas durante o decaimento do radônio, sendo importante manter períodos de tempo maiores de integração, geralmente mais de dois dias, para contagens estaticamente estáveis em ambientes com concentrações moderadas do gás. As concentrações mínimas detectáveis típicas de um período de exposição de sete dias, amostragem de curta duração, são da ordem de  $20 \text{ Bq m}^{-3}$ .<sup>44,68</sup>

Pode-se melhorar a sensibilidade desses tipos de equipamento aplicando altas voltagens a câmara onde ocorre o decaimento eletrolítico em contato com o detector. No entanto, um dos interferentes comuns desse tipo de detector é a umidade relativa do ar que pode afetar na acuidade do método, isso ocorre devido à recombinação dos íons polônio, isótopo filho do radônio, com os íons hidroxila, da umidade do ar.<sup>68,69</sup> Em condições ideais de amostragem, os detectores de integração eletrônica mostram uma eficiência alta de resposta e contagem de background baixa ou inexistente.<sup>69</sup>

### 3.5. Monitores contínuos de radônio

Os monitores contínuos são detectores ativos de radônio em que o ar entra para a câmara de detecção por difusão ou com a atuação de uma pequena bomba, todos eles possuem circuitos elétricos que fornecem um relatório da análise e um registro com resolução temporal o que permite o cálculo da concentração de radônio por períodos específicos.<sup>6,44</sup>

Por difusão ou com o emprego de uma pequena bomba, os detectores contínuos coletam o ar a ser analisado em uma câmara contendo um sensor, que podem ser células de cintilação, câmaras de ionização ou detectores de silício de estado sólido.<sup>44,68</sup>

Alguns tipos de monitores contínuos permitem a diferenciação entre radônio e torônio, como por exemplo o RAD7. Um detector de silício alfa de estado sólido capaz de medir a concentração do gás radônio diretamente sem sofrer interferência da presença dos isótopos filhos, uma vez que os interferentes são retidos em um filtro interno por onde as amostras de ar passam ao chegar à câmara de análise.<sup>44,70</sup> Tais instrumentos exigem calibrações periódicas para garantir um funcionamento adequado e resultados confiáveis.

As células de cintilação, ou Células de Lucas, consistem de um cilindro metálico fechado com uma abertura pela qual

há a difusão do gás e as superfícies internas das células são cobertas por um cintilador, comumente o ZnS:Ag. O ar a ser analisado é filtrado antes de entrar na célula evitando que os isótopos-filhos do radônio entrem, minimizando, assim, os interferentes emissores de partícula alfa. Por fim, a interação das partículas alfa emitidas no decaimento do gás radônio com a superfície cintiladora irá produzir pulsos de luz que serão registradas por um tubo fotomultiplicador e rede eletrônica associada.<sup>42</sup>

Nas câmaras de ionização um campo elétrico é estabelecido entre dois ou mais eletrodos e, como os outros monitores contínuos de radônio, o ar filtrado pode se difundir para a câmara ou é bombeado para dentro e a corrente causada pela ionização do gás dentro da câmara é detectada. A ionização medida é causada pelo decaimento do radônio e seus isótopos-filhos, ou a ionização total medida ou os pulsos causados por partículas alfa individuais são contados separadamente, sendo que o último método permite a distinção entre os diferentes emissores alfas, uma vez que diferentes isótopos emitem partículas alfa com energias díspares.<sup>42</sup>

## 4. Radônio no Brasil

A exposição à radiação ionizante pode variar de uma região para outra com as mudanças nos perfis geológicos, geográficos, físicos e culturais de cada local, por exemplo: áreas cuja geologia é caracterizada pela presença de minerais enriquecidos em urânio e tório apresentarão maiores níveis de radioatividade ambiental, maior *background* radioativo, em comparação com outras em que o perfil geológico é empobrecido em isótopos radioativos.<sup>20</sup>

A geologia brasileira varia largamente em todo o território nacional, apresentando regiões com elevados potenciais de radioatividade ambiental, apesar disso as medidas preventivas para diminuição da presença de radônio, como a selagem de pisos e paredes, são pouco implementadas nas construções do país.<sup>7,71</sup>

A concentração típica de radônio no solo varia de 4 a  $40 \text{ kBq m}^{-3}$ , consideravelmente maior que a encontrada na atmosfera, estimada na faixa de 4,0 a  $19 \text{ Bq m}^{-3}$ .<sup>72,73</sup> No Brasil, tal concentração média anual é estimada entre 0,6 a  $28 \text{ Bq m}^{-3}$ , inferior a estimativa mundial de  $82 \text{ Bq m}^{-3}$ .<sup>10,74</sup> Externamente, onde é diluído em baixas concentrações, representa um risco significativamente menor do que dentro de edifícios, onde pode se acumular em níveis elevados. A magnitude da concentração de radônio em ambiente fechados depende principalmente: do material de construção usado, da composição do solo sob e ao redor do edifício, grau de ventilação do ambiente e parâmetros meteorológicos, como umidade, precipitação, pressão atmosférica e temperatura.<sup>8,75</sup>

De forma geral, o Brasil é considerado um país livre de grandes problemas com o acúmulo de radônio em ambientes fechados devido ao clima tropical que permite uma maior

ventilação dos ambientes internos e por causa dos estilos de construção e hábitos de vida comuns.<sup>79</sup>

No entanto, algumas pesquisas regionais mostraram que isso não é necessariamente uma regra, como pode ser visto na Tabela 2 as concentrações de radônio em ambientes fechados variaram largamente no território brasileiro. As menores concentrações foram encontradas em estudos pontuais no Hospital Universitário Antônio Pedro, na cidade de Niterói- RJ e em vinte quatro residências em Natal-RN.<sup>52,63</sup> Já as maiores concentrações foram observadas em casas de SPA situadas em Araxá-MG e em Poços de Caldas-MG, ambas as regiões conhecidas pela presença de altas concentrações de urânio e tório.<sup>50,57,77,80</sup>

Nota-se que 60% dos estudos obtiveram concentrações médias de radônio superiores a 100 Bq m<sup>-3</sup>, valor máximo recomendável pela Organização Mundial da Saúde e pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, e 12% apresentaram níveis médios acima valor limite aceitável de 300 Bq m<sup>-3</sup>, sendo recomendada a aplicação de medidas mitigatórias para a adequação desses imóveis aos padrões de radioatividade ambiental.<sup>6,41</sup>

O gás pode se difundir para ambientes internos através de rachaduras em pisos e paredes, juntas de construções,

pelas lacunas em pisos suspensos, tubulações de água e gás e em menor grau por meio da água de poços.<sup>7,8,10,63</sup>

Sabe-se que as maiores concentrações de radônio são encontradas em porões e no piso térreo, tal concentração diminui à medida que aumenta o pavimento.<sup>7,8,63</sup> No entanto, fatores como a estrutura, o tipo de material de construção e o grau de ventilação dos ambientes afetam positiva ou negativamente o acúmulo.<sup>10,76</sup>

Exemplos dessa relação geologia e concentração de radônio em ambientes fechados podem ser encontrados nos estudos desenvolvidos pela Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais, no Planalto de Poços de Caldas, entre 2004 e 2013, região reconhecida por suas anomalias radioativas e por suas jazidas de urânio e tório. Com esse trabalho, buscamos disponibilizar à população residente na área, informações sobre a ocorrência de câncer e realizar medições da radiação ionizante natural: a radiação gama ao ar livre e a radiação alfa oriunda do radônio nas residências. Foram amostrados 677 domicílios localizados em um raio de até 20 km a partir de uma mina de urânio, englobando os municípios de Poços de Caldas, Caldas e Andradas. As concentrações encontradas variaram entre 7,2 a 1645,3 Bq m<sup>-3</sup>, apresentando um valor médio de 104,2 Bq m<sup>-3</sup>.<sup>77,78</sup>

**Tabela 2.** Concentrações de radônio em residências e outros locais fechados no Brasil relatados na literatura

Cidade/Estado	Conc. Mín (Bq m <sup>-3</sup> )	Conc. Média (Bq m <sup>-3</sup> )	Conc. Máx (Bq m <sup>-3</sup> )	Referência
Natal, RN	3,2	15,4	40,0	Malanca et al [52]
12 cidades no RN e uma no CE*	3,2	17,7	140	Malanca e Gaidolfi [81]
Campinas, SP	27,9 ± 6,2	54,8 ± 8,8	150,8 ± 14,9	Guedes et al [46]
Araxá, MG	258 ± 20	663 ± 43	1634 ± 111	Campos et al [57]
Rio de Janeiro, RJ	< 5,0	43	200	Magalhães et al [59]
Poços de Caldas, MG	33 ± 23	150 ± 17	665 ± 4	Neman et al [80]
Poços de Caldas, MG	12	140,5	1024	Veiga et al [50]
São Paulo, SP	33	107	561	da Silva e Yoshimura [53]
Baixada Santista, SP	56	124	168	Geraldo et al [60]
São Vicente, SP	68 ± 7	217 ± 26	610 ± 55	Marques et al [58]
Curitiba e Campo Largo, PR	5,0	321,2	640,0	Corrêa et al [54]
Campinas, SP	16,7 ± 4,9	81,9 ± 12,6	310 ± 40	Hadler et al [47]
Brasília, DF	72 ± 5	116 ± 7	156 ± 8	Nicoli et al [82]
RMBH**, MG	18,5	148	2671,4	Santos et al [83]
Lages Pintadas, RN	20,0	376	3723	Campos et al [84]
Rio de Janeiro, RJ	14	84	247	Carneiro et al [56]
Poços de Caldas, MG	7,2	104,2	1645,3	Brasil [77]
RMBH**, MG	-	115 ± 12	-	Lara et al [61]
São Paulo, SP	-	142	-	Yoshimura et al [85]
Natal, RN	5,0	55,4	160,0	Marcon et al [62]
Lucrécia, RN	56,6	260,6	2098,7	Marcon et al [62]
Niterói, RJ	0,1	12,3	67,9	Silva et al [63]
Porto Alegre, RS	17,0	42,6	103	Prado et al [49]
Timóteo, MG	0,1	104,6	673	e Silva et al [34]
Rio de Janeiro, RJ	0,0	25,2	101	e Silva et al [64]

\*Cidades amostradas por Malanca e Gaidolfi, 1997: Natal, Nova Cruz, São Paulo do Potengi, Barcelona, Pedro Avelino, Bosó, Currais Novos, Angicos, Santana do Matos, Assú e Mossoró (RN) e Fortaleza (CE). \*\*RMBH: Região metropolitana de Belo Horizonte, MG.

Em contrapartida, os baixos teores de isótopos de rádio, particularmente o  $^{226}\text{Ra}$ , nos solos de Natal- RN, em torno de  $10,4 \text{ Bq Kg}^{-1}$  e nos materiais de construção produzidos localmente,  $42,6 \pm 6 \text{ Bq Kg}^{-1}$  em tijolos, foram indícios observados por Malanca *et al.*<sup>52</sup> e Marcon *et al.*<sup>62</sup> que justificavam os baixos a médios níveis de radônio encontrados nas residências da capital do estado.

Como o Brasil apresenta, entre outros fatores, uma grande extensão territorial, diversidade climática e geológica, coberturas de solo não homogêneas, densidade populacional variável, levantamentos densos cobrindo todo o país, como os realizados por exemplo, em vários países europeus, Oriente Médio, Estados Unidos e Canadá, não são uma tarefa simples de ser realizada, nem tecnicamente viáveis sem antes haver a implementação de um extenso projeto nacional com todas as etapas bem definidas, desde a amostragem até a discussão e divulgação dos resultados.<sup>10,24,29,30,32,35,71,79</sup>

Em 2012, no Primeiro Seminário Brasileiro de Radônio, começou-se a delinear a ideia de um mapeamento brasileiro de radônio e iniciou-se as primeiras discussões sobre os procedimentos a serem adotados, tais como a metodologia a ser utilizada, o detector mais adequado, os locais de amostragem e o número de amostras, como registrar os dados de amostragem (localização geográfica e temporal de cada amostra) e a logística administrativa do projeto.<sup>71,79</sup>

## 5. Cálculo de Dose Anual Efetiva

Com base nos dados de concentração obtidos da literatura foi possível fazer uma estimativa da dose anual efetiva por inalação de radônio a qual os brasileiros das regiões amostradas estão expostos, os resultados estão ilustrados na Figura 3. É importante salientar que um cálculo mais preciso é necessário para melhor avaliar a situação de cada localidade, considerando a função social de cada um dos imóveis amostrados, os hábitos dos indivíduos que o

frequentam, por exemplo, preferência por ventilação natural ou mecânica dos cômodos, e o clima da região.

O cálculo de dose é realizado empregando a Equação 1 proposta pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica, como mostrado a seguir.

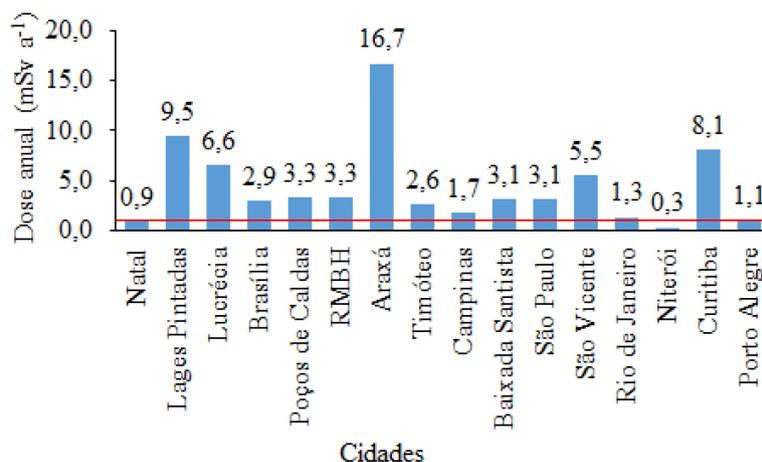
$$D = C \cdot \text{Feq} \cdot \text{Fo} \cdot T \cdot \text{Fc} \quad (1)$$

onde: D = dose anual efetiva por inalação; C = Concentração de radônio em  $\text{Bq m}^{-3}$ ; Feq = Fator de equilíbrio (0,4); Fo = Fator de ocupação (0,8); T = Tempo de exposição; Fc = Fator de conversão de dose ( $9,0 \text{ nSv Bq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^3$ )

Nela são levados em consideração a concentração de radônio medida; o fator de ocupação do local amostrado, que pode variar de acordo com os hábitos da população e clima da região, aumentando ou diminuindo de uma área para outra; o fator de equilíbrio, que é uma medida do grau de desequilíbrio entre o radônio e sua progênie, tabelada pela UNSCEAR como 0,4 para ambientes internos e 0,6 para externos; o período de exposição à essa radioatividade; e um fator de conversão de dose.<sup>20,86</sup>

Nesse estudo foram considerados um fator de ocupação de 0,8, tal como o recomendado pela UNSCEAR, um fator de equilíbrio de 0,4, por se tratar de estudos em ambientes fechados, fator de conversão de dose de  $9,0 \text{ nSv Bq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^3$ , período de exposição de 1 ano (equivalente a 8760 h/ano) e as médias de concentrações de radônio obtidas em cada uma das cidades dos estudos citados.<sup>20</sup> Foi utilizada uma média das concentrações de radônio reportadas em um mesmo município, mas em estudos de autores diferentes.

O cálculo de dose anual por município mostrou que cerca de 90% das cidades estudadas indicaram uma exposição à radioatividade natural superior a  $1,0 \text{ mSv a}^{-1}$ , valor recomendado pela OMS e ICRP. Apontando a necessidade de implementação de medidas mitigatórias, como a selagem dos pisos e paredes das residências, de forma a prevenir a entrada de radônio proveniente do solo e um aumento da ventilação interna, que resultaria além da melhora da



**Figura 3.** Dose anual efetiva a qual os indivíduos do público estão expostos cotidianamente nas cidades estudadas. A linha vermelha representa o limite máximo de  $1,0 \text{ mSv a}^{-1}$  recomendados pelos órgãos regulamentadores (OMS e ICRP).  
Fonte: Elaborada pelas autoras a partir do levantamento bibliográfico realizado na base Scopus

qualidade do ar de maneira geral, na diminuição da diferença de pressão no interior das casas com a pressão do solo, reduzindo a tendência de migração do radônio do solo para o ar dentro das construções.

## 6. Radônio no Mundo

Por muitas décadas, os efeitos da radiação ionizante no homem foram negligenciados, no entanto, as consequências tornaram-se evidentes no final do século XIX, quando se tornou frequente a utilização desta direta ou indiretamente em prol do benefício humano.<sup>87</sup> Assim, buscou-se prioritariamente identificar e descrever os danos causados por exposição aguda, como nos casos de acidentes ou de uso medicinal. Recentemente, tais esforços se voltaram para a compreensão dos possíveis efeitos de exposições às radiações naturais.

A pesquisa sobre a mortalidade por câncer de pulmão em mineiros expostos à progênie de radônio é substancial e consistente. Por volta de 1926 iniciaram-se os estudos relacionando as mortes por câncer pulmonar de mineiros com a exposição ao radônio e sua progênie, alguns com períodos de acompanhamento superiores a trinta anos, conduzidos em minas de exploração de metais, fluorita, xisto e urânio nos Estados Unidos, Canadá, Austrália, China e Europa.<sup>7,9</sup>

Esses estudos epidemiológicos têm mostrado consistentemente um aumento na ocorrência de câncer de pulmão com a exposição a produtos do decaimento do radônio, apesar das diferenças nas populações e metodologias do estudo e foram base para a definição dos limites de dose de exposição ocupacional e não ocupacional, valores que são continuamente atualizados com novas observações.<sup>5,7,88</sup>

As primeiras medidas de radônio em ambientes internos remontam à década de 1950, no entanto, só a partir da década de 1970, começou-se a preocupação com o acúmulo desse gás em áreas habitadas e viu-se um aumento do número de estudos em residências em alguns países. Atualmente,

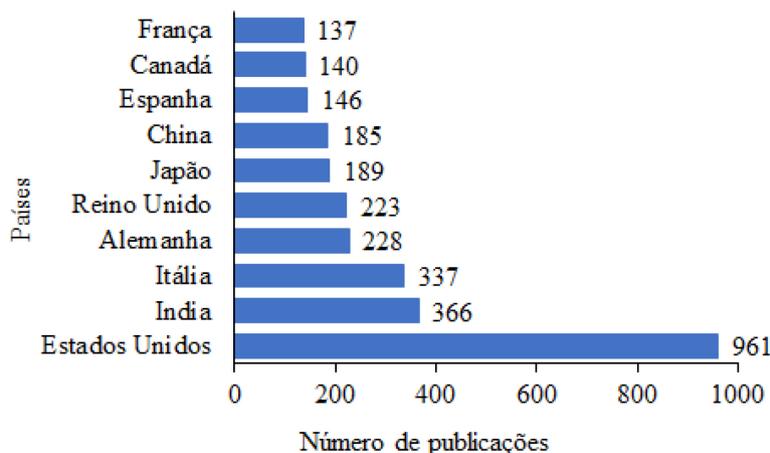
pesquisas abrangentes de radônio em residências e locais de trabalho, bem como estratégias de gestão, já foram implementadas em muitos países.<sup>7,9</sup> Comparativamente, a Figura 4 ilustra os dez países com maior número de publicações na área.

O desenvolvimento de programas como o *IAQ management*, que busca minimizar a exposição dos estudantes e funcionários de escolas estadunidenses ao gás radônio, proposto pela Agência de Proteção Ambiental (EPA), e diretrizes como *Revisiting Canada's radon guideline*, *Home buyer's and Seller's Guide to Radon*, *Survey on radon guidelines, programmes and activities*, e *The Environmental behaviour of radium: revised* cujos objetivos são informar a população a respeito das consequências da exposição contínua aos isótopos radioativos e propor um monitoramento além de soluções para o acúmulo a níveis elevados desses elementos no ambiente, exemplificam os esforços gastos na melhora da proteção radiológica dos indivíduos do público.<sup>6,7,89-91</sup>

Uma comparação dos níveis de radônio obtidos no levantamento bibliográfico deste trabalho com outros ao redor do mundo é apresentada na Tabela 3. Vale destacar a grande variabilidade de dados observada em diferentes países, desde concentrações relativamente baixas, médias inferiores a 100 Bq m<sup>-3</sup>, observadas nas cidades de Niterói e Rio de Janeiro no estado do Rio de Janeiro, e em algumas cidades dos estados do Ceará e Rio Grande do Norte no nordeste do Brasil, com exceção de Lucrécia- RN, comparáveis a levantamentos radioisotópicos realizados na Polônia e Jordânia.

## 7. Considerações Finais

Este estudo buscou realizar uma revisão abrangente de todas as informações publicadas em periódicos científicos sobre a radioatividade natural decorrente do radônio em ambientes fechados no Brasil nos últimos anos, buscou-se também discutir sobre as potenciais consequências



**Figura 4.** Comparação numérica dos dez países com maior produção bibliográfica sobre radônio indoor.

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir do levantamento bibliográfico realizado na base Scopus.

**Tabela 3.** Comparação dos resultados dos estudos brasileiros obtidos nesta revisão com outros estudos internacionais

País	Conc. Rn (Bq m <sup>-3</sup> )	Conc Média (Bq m <sup>-3</sup> )	Referências
Alemanha*	8,0 a 922,0	56,5	Kreienbrock et al [92]
Finlândia*	12,0 a 3436,0	375	Korhonen et al [93]
Jordânia*	7,44 – 102,01	26,28	Abu-Haija et al [94]
Nigéria*	20,0 a 37,1	26.3 ± 4.17	Oni et al [95]
Portugal*	94,0 a 7066,0	568	Martins et al [96]
Croácia*	9 - 1673	102	Radolić et al [33]
Irã	3,92 – 520,12	117,4 ± 97,7	Sherafat et al [32]
Azerbaijão	0 - 1109	84,0	Hoffmann et al [31]
Turquia	1 – 1400	81,0	Celebi et al [29]
Polônia*	3,0 - 58	15,0 e 20,0**	Kozak et al [97]
Argentina	4,4 – 286,0	39,0	Canoba et al [36]
México	7,1 – 300,0	67,9	Canoba et al [36]
Equador	20,39 – 225,66	94,30	Canoba et al [36]
Venezuela	15 - 346	52,50	Canoba et al [36]
Irlanda	5 - 1001	77,0	Dowdall et al [98]
Grécia	0 - 630	44,0	Nikolopoulos et al [99]

\*Os estudos em destaque foram realizados em escala local e não representam as variações dos níveis de radônio encontradas em todo o território nacional. \*\* Kozak et al estudaram a influência da utilização de um ar-condicionado na concentração de radônio em um auditório. 15,0 Bq m<sup>-3</sup> representa a concentração média de radônio no local quando o ar-condicionado estava ligado, enquanto 20,0 Bq m<sup>-3</sup> foi encontrado quando não havia uso do aparelho.

da exposição humana a essa radiação. Foi notória a heterogeneidade da distribuição dos estudos pelo país e a defasagem de informações em algumas regiões do país, como a Norte e Centro-Oeste, mostrando a necessidade de uma melhor discussão sobre o tema em um nível nacional e a implementação de leis e políticas públicas que regulamentem a exposição humana à radiação natural ionizante, a fim de prevenir e minimizar os riscos de desenvolvimento de câncer ou outras doenças crônicas.

Foi constatado, que a maioria dos estudos, 60%, apresentaram médias de concentração acima do limite internacional recomendável de 100 Bq m<sup>-3</sup>, sendo 12% desses com níveis de radônio superiores ao limite aceitável de 300 Bq m<sup>-3</sup>. Ademais, foi observado que grande parte dos trabalhos encontrados carecem de informações sobre os riscos da exposição à radiação ionizante natural para a saúde humana. Desse modo, essa revisão poderá servir como base para futuros estudos nessa temática, principalmente em regiões onde não há dados a respeito, e também como incentivo aos órgãos regulamentadores, sobre a busca por medidas e diretrizes que minimizem a exposição e riscos da população no Brasil.

## Referências Bibliográficas

- Bonotto, D. M.; *Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani*, Editora UNESP: São Paulo, 2004.
- Bolus, N. E.; NCRP Report 160 and What It Means for Medical Imaging and Nuclear Medicine. *Journal of Nuclear Medicine Technology* **2013**, *41*, 255. [CrossRef]
- Sítio do IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Disponível em: <[https://www.ipen.br/portal\\_por/portal/interna.php?secao\\_id=878&campo=10891](https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=878&campo=10891)>. Acesso em: 16 setembro 2020.
- Santos, F. P. C.; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <[https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/9266/1/arquivo2670\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/9266/1/arquivo2670_1.pdf)>. Acesso em: 14 agosto 2020.
- United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2016 Report- Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations: New York, 2017
- World Health Organization. Handbook on indoor radon: a public health perspective. Zeeb, H.; Shannoun, F. eds., WHO: Geneva, 2009. [Link]
- United States Environmental Protection Agency. Consumer's Guide to Radon Reduction: How to fix your home. 2016. [Link]
- Xie, D.; Liao, M.; Kearfott, K. J.; Influence of environmental factors on indoor radon concentration levels in the basement and ground floor of a building- A case study. *Radiation Measurements*, **2015**, *82*, 52. [CrossRef]
- Afonso, J. C.; Radônio. *Química nova na escola* **2009**, *32*, 267. [Link]
- United States Environmental Protection Agency. Assessment of risks from radon in homes. EPA: Washington, 2003. [Link]
- Santos, M. O.; Estimativa 2018: Incidência de câncer no Brasil. *Revista Brasileira de Cancerologia* **2018**, *64*, 1. [CrossRef]
- Bray, F.; Ferlay, J.; Soerjomataram, I.; Siegel, R. L.; Torre, L. A.; Jemal, A.; Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *ACS Journal* **2018**, *68*, 394. [CrossRef]

13. Ferlay, J.; Soerjomataram, I.; Ervik, M.; Dikshit, R.; Eser, S.; Mathers, C.; Rebelo, M.; Parkin, D.M.; Forman, D.; Bray, F.; GLOBOCAN 2012: Estimated cancer incidence, mortality and prevalence worldwide in 2012. Lyon, France: IARC. 2013. Disponível em: < <https://publications.iarc.fr/Databases/Iarc-Cancerbases/GLOBOCAN-2012-Estimated-Cancer-Incidence-Mortality-And-Prevalence-Worldwide-In-2012-V1.0-2012> >. Acesso em: 18 agosto 2020
14. INCA- Estimativa 2020: Incidência de câncer no Brasil. Rio de Janeiro: INCA. 2019. Disponível em: < <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files//media/document//estimativa-2020-incidencia-de-cancer-no-brasil.pdf> >. Acesso em: 14 agosto 2020.
15. Momčilović, B.; Alkhatib, H. A.; Duerre, J. A.; Cooley, M.; Long, W. M.; Harris, T. R.; Lykken, G. I.; Environmental Lead-210 and Bismuth-210 accrue selectively in the brain proteins in alzheimer disease and brain lipids in parkinson disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders* **2001**, *15*, 106. [CrossRef]
16. Neilson, S.; Robinson, I.; Rose, F. C.; Ecological correlates of motor neuron disease mortality: a hypothesis concerning an epidemiological association with radon gas and gamma exposure. *Journal of Neurology* **1996**, *243*, 329. [CrossRef]
17. Neuberger, J. S.; Nazir, N.; Keighley, J.; Lynch, S.; *Resumo do 57º Encontro da Sociedade de Física da Saúde*, 2011. [Link]
18. Groves-Kirkby, C.J.; Denman, A.R.; Campbell, Jackie; Crockett, Robin G.M.; Phillips, Paul S.; Rogers, Stephen.; Is environmental radon gas associated with the incidence of neurodegenerative conditions? A retrospective study of multiple sclerosis in radon affected áreas in England and Wales. *Journal of Environmental Radioactivity* **2016**, *154*, 1. [CrossRef]
19. Asher-Bolinder, S.; Owen; Douglas, E.; Schumann, R. Randall.; In *Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water*. Gundersen, L. C. S.; Wanty, Richard, B., eds.; Geological Survey: Washington, 1991, cap. 3. [Link]
20. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations: New York, 2000. [Link]
21. Marley, F.; Denman, A. R.; Phillips, P. S.; Studies of radon and radon progeny in air conditioned rooms in hospitals. *Radiation Protection Dosimetry* **1998**, *76*, 273. [CrossRef]
22. Singh, K. P.; Malik, A.; Mohan, D.; Sinha, S.; Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) – a case study. *Water Research* **2005**, *38*, 3980. [CrossRef]
23. Wisocka, M.; Kottyrba, A.; Chalupnik, S.; Skowronek, J.; Geophysical methods in radon risk studies. *Journal of Environmental Radioactivity* **2005**, *32*, 351. [CrossRef]
24. García Talavera M.; García-Pérez, A.; Rey, C.; Ramos, L.; Mapping radon-prone areas using  $\gamma$ -radiation dose rate and geological information. *Journal of Radiological Protection* **2013**, *33*, 605. [CrossRef]
25. Barazza, F.; Gfeller, W.; Palacios, M.; Murith, C.; An investigation of the potential causes for the seasonal and anual variations in indoor radon concentrations. *Radiation Protection Dosimetry* **2015**, *167*, 75. [CrossRef]
26. Minkin, L.; Shapovalov, A.; Thermo-diffusional radon waves in soils. *Science of the Total Environment* **2016**, *565*, 1. [CrossRef]
27. National Radiological Protection Board; *Health risks from radon*, National radiological Protection Board: Didcot, 2010. [Link]
28. Kitto, M. E.; Green, J. G.; Mapping the indoor radon potential in New York at the township level. *Atmospheric Environment* **2008**, *42*, 8007. [CrossRef]
29. Celebi, N.; Atakson, B.; Taskin, H.; Albayrak Bingoldag, N.; Indoor Radon Measurements in Turkey Dwellings. *Radiation Protection Dosimetry* **2015**, *167*, 626. [CrossRef]
30. Szabó, K.Z.; Jordan, G.; Horváth, Á.; Szabó, C.; Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity* **2014**, *129*, 107. [CrossRef]
31. Hoffmann, M.; Aliyev, C. S.; Feyzullayev, A. A.; Baghirlı, R. J.; Veliyeva, F. F.; Pampuri, L.; Valsangiacomo, C.; Tollefsen, T.; Cinelli, G.; First Map of Residential Indoor Radon Measurements in Azerbaijan. *Radiation Protection Dosimetry* **2016**, *175*, 186. [CrossRef]
32. Sherafat, S.; Mansour, S.N.; Mosaferi, M.; Aminisani, N.; Yousefi, Z.; Maleki, S.; First indoor radon mapping and assessment excess lifetime cancer risk in Iran. *MethodsX* **2019**, *6*, 2205. [CrossRef]
33. Radolić, V.; Miklavčič, I.; Sovilj, M.P.; Stanić, D.; Petrinc, B.; Vuković, B.; The natural radioactivity of Istria, Croatia. *Radiation Physics and Chemistry* **2019**, *155*, 332. [CrossRef]
34. Silva, C. R.; Smoak, J. M.; Silva-Filho, E. V.; Residential radon exposure and seasonal variation in the countryside of southeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* **2020**, *192*, 544. [CrossRef]
35. CAREX Canada, 2020. Radon Environmental Exposures. Disponível em: < <https://www.carexcanada.ca/profile/radon-environmental-exposures/> >. Acesso: 13 setembro 2020.
36. Canoba, A.; López, F.O.; Arnaud, M. I.; Oliveira, A. A.; Neman, R. S.; Hadler, J. C.; Iunes, P. J.; Paulo, S. R.; Osorio, A. M.; Aparecido, R.; Rodríguez, C.; Moreno, V.; Vasquez, R.; Espinosa, G.; Golzarri, J. I.; Martínez, T.; Navarrete, M.; Cabrera, I.; Segovia, N.; Peña, P.; Taméz, E.; Pereyra, P.; López-Herrera, M. E.; Sajo-Buhus, L.; Indoor radon measurements in six Latin American countries. *Geofísica Internacional* **2002**, *41*, 453. [Link]
37. Dantas, R. C.; Navoni, J. A.; de Alencar, F. L. S.; Xavier, L. A. C.; do Amaral, V.; S. Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. *Environmental Science and Pollution Research* **2019**, *27*, 143. [CrossRef]
38. Indústrias Nucleares Brasileiras. 2020. Onde podemos encontrar recursos de urânio no Brasil? Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/onde-podemos-encontrar-reservas-de-uranio-no-brasil?Origem=426>>. Acesso em 11 de setembro 2020.
39. Departamento Nacional de Produção Mineral. Urânio. 2017. Disponível em: < <http://antigo.anm.gov.br/portal/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-3-uranio/view> >. Acesso em 11 de setembro 2020.
40. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Diretrizes básicas de proteção radiológica. In: \_\_\_\_\_. Norma CNEN NN 3.01, Resolução 164/14. [S.1.], 2014.

41. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, New York, 2007. Disponível em: <[https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB\\_37\\_2-4](https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_37_2-4)>. Acesso em: 2 novembro 2020.
42. Miles, J.; Methods of radon measurement and devices. Resumo da 4ª Conferência Europeia sobre Proteção contra o radônio em casa e no trabalho, 2004. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/36/010/36010924.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/010/36010924.pdf)>. Acesso em: 15 outubro 2020.
43. Brain, M.; Freudenrich, C. How Radon Works. 2000. Disponível em: <<https://home.howstuffworks.com/home-improvement/household-safety/radon.htm>>. Acesso em: 15 outubro 2020.
44. Instituto de Radiação e Dosimetria. Manual da OMS sobre radônio em ambientes internos: uma perspectiva de saúde pública. Zeeb, H.; Shannoun, F., eds., 2016.
45. Hadler, J. C.; Iunes, P.J.; Paulo, R.; A possibility of monitoring indoor radon daughters by using CR-39 as an alpha-spectrometer. *Radiation Measurement* **1995**, 25, 609. [CrossRef]
46. Guedes, S.; Hadler, J. C.; Iunes, P. J.; Navia, L. M. S.; Neman, R. S.; Paulo, S. R.; Rodrigues, V. C.; Souza, W. F.; Tello, C. A.; Zúñiga, A.; Indoor radon and radon daughters survey at Campinas-Brazil using CR-39: first results. *Radiation Measurements* **1999**, 31, 287. [CrossRef]
47. Hadler, J. C.; Neman, R. S.; Iunes, P. J.; Pereira, O. L. S.; Paulo, S. R.; Indoor radon and radon daughters survey at Campinas-Brazil using CR-39: final results. *Radiation Measurements* **2008**, 43, S440. [CrossRef]
48. Corrêa, J. N.; Paschuk, S. A.; Del Claro, F.; Kappke, J.; Perna, A. F. N.; Schelin, H.R.; Denyak, V.; Measurements of indoor Rn-222 activity in dwellings and workplaces of Curitiba (Brazil). *Radiation Physics and Chemistry* **2014**, 104, 104. [CrossRef]
49. Prado, P. H. S.; Roisenberg, A.; Presença de radônio no ar de edificações da área abrangida pelo Granito Viamão em Porto Alegre, Brasil, utilizando detectores tipo CR-39. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ* **2019**, 42, 371. [CrossRef]
50. Veiga, L. H. S.; Koifman, S.; Melo, V. P.; Sachet, I.; Amaral, E. C. S.; Preliminary indoor radon risk assessment at the Poços de Caldas Plateau, MG – Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity* **2003**, 70, 161. [CrossRef]
51. Manocchi, F. H.; Campos, M. P.; Dellamano, J. C.; Silva, G. M.; Radon exposure at a radioactive waste storage facility. *Journal of Radiological Protection* **2014**, 34, 339. [CrossRef]
52. Malanca, A.; de Azevedo, L. L.; Repetti, M.; Gaidolfi, L.; Background airborne radioactivity in an equatorial Brazilian town. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **1997**, 221, 189. [CrossRef]
53. da Silva, A. A. R.; Yoshimura, E. M.; Radon and progeny in the city of São Paulo – Brazil. *Radiation Measurements* **2005**, 40, 678. [CrossRef]
54. Corrêa, J. N.; Paschuk, S. A.; Fior, L.; Schelin, H. R.; da Silva, R. D. F.; Pöttker, F.; Melo, V. P.; <sup>222</sup>Rn measurements at Federal University of Technology (UTFPR, Curitiba, PR, Brazil). Resumo da The Natural Radiation Environment- 8º Simpósio Internacional, **2008**. [CrossRef]
55. Fior, L.; Corrêa, J. N.; Paschuk, S. A.; Denyak, V. V.; Schelin, H. R.; Pecequilo, B. R. S.; Kappke, J.; Activity measurements of radon from construction materials. *Applied Radiation and Isotopes* **2012**, 70, 1407. [CrossRef]
56. Carneiro, G. L.; Braz, D.; de Jesus, E. F.; Santos, S. M.; Cardoso, K.; Hecht, A. A.; da Cunha, M. K. D.; Radon in indoor concentrations and indoor concentrations of metal dust particles in museums and other public buildings. *Environmental Geochemistry and Health* **2013**, 35, 333. [CrossRef]
57. Campos, M. P.; Pecequilo, B. R. S.; Mazzilli, B. P.; <sup>222</sup>Rn and <sup>212</sup>Pb exposures at a Brazilian SPA. *Radiation Protection Dosimetry* **2010**, 141, 210. [CrossRef]
58. Marques, A. L.; Geraldo, L. P.; dos Santos, W.; Levels of natural radon-radioactivity in the São Vicente, SP. Rock Massif. *Radiologia Brasileira* **2006**, 39, 215. [CrossRef]
59. Magalhães, M. H.; Amaral, E. C. S.; Sachett, I.; Rochedo, E. R. R.; Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements. *Journal of Environmental Radioactivity* **2003**, 67, 131. [CrossRef]
60. Geraldo, L. P.; dos Santos, W.; Marques, A. L.; Botari, A.; Medidas dos níveis de radônio em diferentes tipos de ambientes internos na região da Baixada Santista, SP. *Radiologia Brasileira* **2005**, 38, 283. [CrossRef]
61. Lara, E.; Rocha, Z.; Santos, T. O.; Rios, F. J.; Oliveira, A. H.; Soil features and indoor radon concentration prediction: radon in soil gas, pedology, permeability and <sup>226</sup>Ra content. *Radiation Protection Dosimetry* **2015**, 167, 126. [CrossRef]
62. Marcon, A. E.; Navoni, J.A.; Galvão, M. F. O.; Garcia, A. C. F. S.; do Amaral, V. S.; Petta, R. A.; Campos, T. F. C.; Panosso, R.; Quinelato, A. L.; de Medeiros, S. R. B.; Mutagenic potential assessment associated with human exposure natural radioactivity. *Chemosphere* **2017**, 167, 36. [CrossRef]
63. Silva, C.R.; Caldeira, P.P.; Nani, A.S.F.; Silva-Filho, E.V.; Radon levels in a hospital in Niterói municipality- RJ, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2018**, 29, 2580. [CrossRef].
64. e Silva, C. R.; Silva-Filho, E. V.; Radon concentration and radiation exposure levels in workplace buildings of downtown Rio de Janeiro City, SE – Brazil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2020**, 326, 1709. [CrossRef]
65. Vasudevan, L.; McLain, L.; Milton, E.; Atmospheric pressure effects on the calibration constant of alpha-track radon detectors. *Health Physics* **1994**, 66, 318. [CrossRef]
66. Kotrappa, P.; Review of Electret ion chamber technology for measuring technologically enhanced natural radioactivity (IAEA-TECDOC-1271). *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, **2002**. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/016/33016255.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/016/33016255.pdf)>. Acesso em: 20 outubro 2020.
67. Chen, J.; Radon measurement in Canada with electret ion chambers. *Health Physics* **2007**, 93, 161. [CrossRef]
68. El-Taher, A.; An overview of instrumentation for measuring radon in environmental studies. *Journal of Radiation and Nuclear Applications* **2018**, 3, 135. [CrossRef]
69. Roca, V.; de Felice, P.; Esposito, A. M.; Pugliese, M.; Sabbarese, C.; Vaupotich, J.; The influence of environmental parameters in electrostatic cell radon monitor response. *Applied Radiation and Isotopes* **2004**, 61, 243. [CrossRef]

70. Durrige (2016) RAD7 User's Manual. Disponível em: <<https://durrige.com/documentation/RAD7%20Manual.pdf>>. Acesso em 17 Setembro 2020
71. Silva, N. C.; Bossew, P.; Ferreira Filho, A. L.; Campos, T. F. C.; Pereira, A. J. S. C.; Yoshimura, E. M.; Veiga, L. H. S.; Campos, M. P.; Rocha, Z.; Paschuk, S. A.; Bonotto, D. M.; Towards a brazilian radon map: consortium radon Brazil. *Radiation Protection Dosimetry* **2014**, *160*, 226. [CrossRef]
72. Eisenbud, M. Gessel, T.; *Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources*, 4<sup>th</sup> ed, Academic Press: California, 1997.
73. National Research Council. Committee on the Biological effects of Ionizing Radiation- The health effects of radon and other internally deposited alpha-emitters (BEIR-IV). National Academy Press: Washington, 1988.
74. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. Effects of ionizing radiation. 2006. Disponível em: <[https://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR\\_2006\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR_2006_Report_Vol.I.pdf)>. Acesso em 17 Setembro 2020
75. Sharma, N.; Virk, H. S.; Exhalation rate study of radon/thoron in some building materials. *Radiation Measurements* **2001**, *34*, 467. [CrossRef]
76. Brady, N.; Weil, R. R.; *Elementos da natureza e propriedades dos solos*, Editora Bookman: Porto Alegre, 2012.
77. Ministério da Saúde. Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais. Projeto Planalto Poços de Caldas: pesquisa câncer e radiação natural: incidência e comportamentos de risco. Belo Horizonte, 2013.
78. Ministério da Saúde. Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais. Projeto Planalto Poços de Caldas: pesquisa câncer e radiação natural: Minas Gerais- Brasil: 2004 a 2009. Belo Horizonte, 2009.
79. da Silva, N. C.; Bossew, P.; The planned brazilian indoor radon survey - concepts and particular challenges. *Radiation Protection Dosimetry* **2014**, *162*, 105. [CrossRef]
80. Neman, R.; Hadler N, J. C.; Iunes, P. J.; Paulo, S. R.; On indoor radon daughters' plate-out on material surfaces. *Radiation Measurements* **2005**, *39*, 653. [CrossRef]
81. Malanca, A.; Gaudolfi, L.; Environmental Radon in Some Brazilian Towns and Mines. *Radiation Protection Dosimetry* **1997**, *3*, 211. [CrossRef]
82. Nícoli, I. G.; Cardozo, K. M.; Gouvea, V. A.; Radon concentration survey in inner rooms from Deputy Chamber and National Congress – Brasília/DF. *AIP Conference Proceedings* **2008**, *1034*, 185. [CrossRef]
83. Santos, T. O.; Rocha, Z.; Barreto, A. A.; de Souza, L. A. C.; Miguel, R. A.; de Oliveira, A. H.; Assessment of indoor radon distribution in the metropolitan region of Belo Horizonte, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* **2009**, *13*, 10. [Link]
84. Campos, T., Petta, R.; Pastura, V.; Residential radon and the risk of malignity: the case of Lages Pintadas city, North-eastern Brazil. GeoMed2011, Italy, **2011**. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao\\_territorial/geologia\\_medica/bari\\_italia/176.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/geologia_medica/bari_italia/176.pdf)>. Acesso em 17 Setembro 2020.
85. Yoshimura, E. M.; da Silva, A. R.; dos Anjos, R. M.; Umisedo, N. K.; Rizzotto, M.; Velasco, H.; Valladares, D. L.; Radon concentration in air and external gamma dose rate: is there a correlation? *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **2016**, *307*, 787. [CrossRef]
86. International Commission on Radiological Protection. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137, New York, 2017.
87. Sabol, J.; In *Uranium in Plants and the Environment*, Gupta, D. C.; Walther, C.; eds, Springer Nature: Switzerland, 2020, cap. 1 [CrossRef]
88. International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126, New York, 2014.
89. International Atomic Energy Agency. The environmental behaviour of radium: revised edition. Vienna, 2014.
90. Gue, L. Revisiting Canada's radon guideline. Canada: David Suzuki Foundation, 2015. Disponível em: <<https://david Suzuki.org/wp-content/uploads/2017/09/revisiting-canada-radon-guideline.pdf>>. Acesso em 17 setembro 2020.
91. United States Environmental Protection Agency. *Home buyer's and Seller's Guide to Radon*. EPA 402/K-13/002. 2018.
92. Kreienbrock, L.; Kreuer, M.; Gerken, M.; Dingerkus, G.; Wellmann, J.; Keller, G.; Wichmann, E.; Case-Control Study on Lung Cancer and Residential Radon in Western Germany. *American Journal of Epidemiology* **2001**, *153*, 42. [CrossRef]
93. Korhonen, P.; Halonen, R.; Kalliokoski, P.; Kokotti, H.; Indoor radon concentrations caused by construction materials in 23 workplaces. *The Science of the Total Environment* **2001**, *272*, 143. [CrossRef]
94. Abu-Haija, O.; Salameh, B.; Ajlouni, A.W.; Abdelsalam, M.; El-Ebaisat, H.; Measurement of radon concentration inside houses in Tafila Province, Jordan. *International Journal of the Physical Sciences* **2010**, *56*, 696. [Link]
95. Oni, O. M.; Isola, G. A.; Oladapo, O. O.; Oni, E. A.; Estimation of lifetime fatality risk from indoor radon in some offices in a Nigerian University. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* **2012**, *4*, 131. [Link]
96. Martins, L. M. O.; Gomes, M. E. P.; Teixeira, R. J. S.; Pereira, A. J. S. C.; Neves, L. J. P. F.; Indoor radon risk associated to post-tectonic biotite granites from Vila Pouca de Aguiar pluton, northern Portugal. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2016**, *133*, 164. [CrossRef]
97. Kozak, K.; Grzadziel, D.; Polednik, B.; Mazur, J.; Dudzińska, M. R.; Mroczek, M.; Air conditioning impact on the dynamics of radon and its daughters concentration. *Radiation Protection Dosimetry* **2014**, *162*, 663. [CrossRef]
98. Dowdall, A.; Murphy, P.; Pollard, D.; Fenton, D.; Update of Ireland's national average indoor radon concentration- Application of a new survey protocol. *Journal of Environmental Radioactivity* **2017**, *169-170*, 1. [CrossRef]
99. Nikolopoulos, D.; Louizi, A.; Koukouliou, V.; Serefoglou, A.; Georgiou, E.; Ntalles, K.; Proukakis, C.; Radon survey in Greece - risk assessment. *Journal of Environmental Radioactivity* **2002**, *63*, 173. [CrossRef]