



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

JOÃO TADEU DA SILVA SANTANA

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS BIOLÓGICO DO RADÔNIO EM *DROSOPHILA*  
*MELANOGASTER* EM AMBIENTE CONTROLADO E COM ALTOS NÍVEIS DE  
URÂNIO NATURAL**

Recife

2025

JOÃO TADEU DA SILVA SANTANA

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS BIOLÓGICO DO RADÔNIO EM *DROSOPHILA*  
*MELANOGASTER* EM AMBIENTE CONTROLADO E COM ALTOS NÍVEIS DE  
URÂNIO NATURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências. Área de concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear

Orientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Mariana Brayner Cavalcanti Freire Bezerra

Recife

2025

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santana, João Tadeu da Silva.

Avaliação dos efeitos biológicos do radônio em *Drosophila melanogaster* em ambiente controlado e com altos níveis de urânio natural / João Tadeu da Silva Santana. - Recife, 2025.

55f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2025.

Orientação: José Araújo dos Santos Júnior.

Coorientação: Mariana Brayner Cavalcanti Freire Bezerra.

Inclui referências.

1. Bioindicador; 2. Dípteros; 3. Dosimetria; 4. Radioatividade; 5. Radônio. I. Júnior, José Araújo dos Santos. II. Bezerra, Mariana Brayner Cavalcanti Freire. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**JOAO TADEU DA SILVA SANTANA**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS BIOLÓGICO DO RADÔNIO EM DROSOPHILA  
MELANOGASTER EM AMBIENTE CONTROLADO E COM ALTOS NÍVEIS DE  
URÂNIO NATURAL**

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência - CTG, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

Aprovado em: 26/02/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Romilton dos Santos Amaral (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Dra. Darlene Paiva Bezerra (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Dra. Francielle Aline Martins (Examinador Externa)  
Universidade Estadual do Piauí - UESPI

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a mim mesmo.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu quero agradecer a mim mesmo pelo esforço e dedicação. Brincadeira! Na verdade, eu quero agradecer a Deus, pois sem ele eu não teria conseguido chegar até aqui.

Agradeço principalmente pela sabedoria, pelo discernimento e pela saúde, pois sem ela não é possível fazer absolutamente nada. Mesmo diante de tantas situações difíceis, Deus sempre me mostra que é possível continuar.

Como dizia Regina Volpato, inclusive, mãe gosta muito, a gente luta para ter um curso, um emprego, um título... mas, no fim das contas, é o conhecimento que a gente adquire que levamos para a vida. O conhecimento transforma. Ele nos dá a oportunidade de sair de uma realidade e alcançar outra. E isso vale para todo tipo de saber: desde o entendimento sobre determinado assunto até a vivência e o convívio com o outro.

Agradeço imensamente à minha família, meu pai, minha mãe e, especialmente, meus irmãos, por todo apoio e cuidado durante essa caminhada. Nada disso seria possível sozinho. Este trabalho não é, de forma alguma, fruto exclusivo do meu esforço, mas do apoio de muita gente boa ao meu redor.

Agradeço aos colegas e amigos do Grupo RAE, que durante esse período, perturbei bastante, mas cada um sempre ajudou da maneira que podia. Um agradecimento à minha amiga Giovanna, que começou essa jornada comigo e que agora somos mestres!

Quero expressar minha gratidão à professora Julieta (não, não é “a Julieta”, rs), que foi a primeira pessoa a acreditar que tudo isso era possível. Agradeço também a todos os professores do Grupo RAE e a todos que participaram das bancas.

Em especial, agradeço à professora Mariana, minha coorientadora, por toda a ajuda, paciência e apoio ao longo desses dois anos.

E, por fim minha eterna gratidão ao professor José Araújo, que sempre esteve disponível para ajudar, contribuir e orientar. Sempre muito solícito em tudo o que eu precisava para a realização desta pesquisa. Muito obrigado!

## RESUMO

As moscas da espécie *Drosophila melanogaster*, também conhecidas como mosca da fruta, apresentam relevância no setor da pesquisa científica, podendo ser utilizadas como bioindicador de exposição aos agentes tóxicos e radioativos, com potencial para monitoração ambiental dos impactos com Material Radioativo de Ocorrência Natural (NORM), o que promove condições para inferir riscos devido aos efeitos biológicos radioinduzidos, que são decorrentes da interação da radiação ionizante com a matéria. No contexto NORM, destaca-se a importância da dosimetria do radônio, considerando as suas propriedades físicas e radioativas, assim como o potencial risco em ambientes internos, onde o gás radioativo pode ser acumulado, influenciando diretamente na exposição dos seres vivos aos efeitos, principalmente, do isótopo  $^{222}\text{Rn}$  e sua progênie. São muitos os métodos e técnicas aplicadas na monitoração do Rn e descendentes, em sua maioria, modelos passivos e ativos, uma vez que as interações ocorrem de forma indireta, em mecanismos de medidas que dependem de algoritmos para descrever o risco real associado, onde os erros podem ser significativos, a depender do instrumento de medida e experiência operacional. Modelos *in vivo*, simulados e/ou empíricos possibilitam a investigação radiométrica com maior eficiência, potencializando o melhor entendimento sobre os mecanismos de atuação das radiações ionizantes. Esta pesquisa objetiva avaliar a espécie *Drosophila melanogaster*, no seu ciclo de vida e gerações, fazendo uso de ambiente controlado e com níveis elevados de urânio. O estudo baseou-se na exposição das moscas ao gás radônio em câmara específica (CamInd  $\alpha$ -Rn) e no uso de células bioindicadoras (CelBio-RnD). Os experimentos foram realizados em triplicatas, abrangendo três ciclos de exposição que avaliaram duas gerações F1 e F2. O monitoramento da concentração de radônio foi realizado por detectores passivos do tipo CR-39 e corroborado pela câmara de difusão passiva *Corentium Home*, registrando uma média ponderada de exposição de  $1.119 \pm 37 \text{ Bq/m}^3$ , com elevada confiabilidade. As análises fenotípicas incluíram medições de tamanho corporal, morfologia das asas e outras características relacionadas a possíveis danos radioinduzidos, revelando padrões de alterações, mas não significativas dessas alterações, em resposta à exposição ao gás. Os resultados demonstram a viabilidade de modelos *in vivo* para exposição a radiações ionizantes, evidenciando a contribuição de bioindicadores para estudos de dosimetria ambiental. Este trabalho reforça a relevância de abordagens empíricas no monitoramento de áreas impactadas por radionuclídeos naturais e abre caminho para estratégias mais eficazes de mitigação e compreensão dos efeitos biológicos decorrentes da exposição ao radônio.

**Palavras-chave:** Bioindicador; Dípteros; Dosimetria; Radioatividade; Radônio.

## ABSTRACT

Flies of the *Drosophila melanogaster* species, also known as fruit flies, are relevant in the scientific research sector and can be used as a bioindicator of exposure to toxic and radioactive agents, with potential for environmental monitoring of impacts with Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). ), which promotes conditions for inferring risks due to radio-induced biological effects, which result from the interaction of ionizing radiation with matter. In the NORM context, the importance of radon dosimetry stands out, considering its physical and radioactive properties, as well as the potential risk in indoor environments, where radioactive gas can be accumulated, directly influencing the exposure of living beings to the effects, mainly, of the  $^{222}\text{Rn}$  isotope and its progeny. There are many methods and techniques applied to monitoring Rn and descendants, mostly passive and active models, since interactions occur indirectly, in measurement mechanisms that depend on algorithms to describe the real associated risk, where errors can be significant, depending on the measurement instrument and operational experience. In vivo, simulated and/or empirical models enable radiometric investigation with greater efficiency, enhancing a better understanding of the mechanisms of action of ionizing radiation in vivo. In the applied context, the research aims to evaluate the *Drosophila melanogaster* species, in its life cycle and generations, using a controlled environment and high levels of uranium. The study was based on exposing flies to radon gas in a specific chamber (CamInd  $\alpha$ -Rn) and the use of bioindicator cells (CelBio-RnD). The experiments were carried out in triplicates, covering three exposure cycles that evaluated the F1 and F2 generations. Radon concentration monitoring was carried out by CR-39 type passive detectors and corroborated by the Corentium Home passive diffusion chamber, recording a weighted average exposure of  $1,119 \pm 37 \text{ Bq/m}^3$ , with high reliability and statistical consistency. Phenotypic analyzes included measurements of body size, wing morphology and other characteristics related to possible radio-induced damage, revealing patterns of changes, but not significant, in response to exposure to the gas. The results demonstrate the viability of vivo models for exposure to ionizing radiation, highlighting the contribution of bioindicators to environmental dosimetry studies. This work reinforces the relevance of empirical approaches in monitoring areas impacted by natural radionuclides and paves the way for more effective strategies for mitigating and understanding the biological effects resulting from exposure to radon.

**Keywords:** Bioindicator; Diptera; Dosimetry; Radioactivity; Radon.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de ação direta e indireta da radiação.....	19
Figura 2 - Ciclo de vida das <i>Drosophila melanogaster</i> .....	23
Figura 3 - Dimorfismo sexual das <i>Drosophila melanogaster</i> .....	26
Figura 4 - Fluxograma estrutural da pesquisa .....	27
Figura 5 - Desenho experimental com as <i>Drosophila melanogaster</i> . .....	37
Figura 6 - Imagem do CR-39 processada pelo Quantikov. ....	39
Figura 7 - Concentração do Rn pelo tempo de exposição .....	41
Figura 8 - Distribuição dos CR-39 nas três posições no suporte dentro da CelBio-RnD.....	42
Figura 9 - Distribuição normal para os dados de monitoração das <i>Drosophila melanogaster</i> .	43
Figura 10 - Medidas de radônio com Airthrings, gráfico de função de densidade de.....	46
Figura 11 - Correlação do tamanho corporal das <i>Drosophila melanogaster</i> . ....	48
Figura 12 - Alterações morfológicas nas asas de <i>Drosophila melanogaster</i> observadas durante os experimentos. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação do Rn indoor utilizando o CR-39 .....	40
Tabela 2 - Avaliação do Rn indoor utilizando o CR-39 durante exposição das <i>Drosophila melanogaster</i> .....	43
Tabela 3 - Comparação das alterações nas asas e a frequência de eclosão das <i>Drosophila melanogaster</i> por geração alterada. ....	50
Tabela 4 - Distribuição Total de <i>Drosophila melanogaster</i> por geração e sexo.....	51

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
3.1 RADIOATIVIDADE NATURAL .....	16
3.2 RADÔNIO.....	16
3.3 EFEITOS BIOLÓGICOS RADIOINDUZIDOS .....	18
<b>3.3.1 Medidores de radônio.....</b>	<b>20</b>
3.4 BIOINDICADORES DE EXPOSIÇÃO À RADIAÇÕES IONIZANTES.....	22
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
4.1 EXPOSIÇÃO DAS DROSOPHILA MELANOGASTER AO RADÔNIO .....	27
4.2 CÉLULA BIOINDICADORA DE RADÔNIO E DESCENDENTES .....	28
4.3 MONITORAMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO Rn NA CelBio-RnD .....	29
4.4 SELEÇÃO DROSOPHILA MELANOGASTER.....	33
<b>4.4.1 Cultivo e manuseio das Drosophila melanogaster .....</b>	<b>33</b>
<b>4.4.2 Acasalamento .....</b>	<b>34</b>
<b>4.4.3 Avaliação das Características Fenotípicas e Medição do Tamanho Corporal das Drosophila melanogaster. ....</b>	<b>34</b>
4.5 Desenho Experimental para exposição das Drosophila melanogaster na CamInd $\alpha$ -Rn....	36
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	38
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
5.1 MONITORAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO RADÔNIO NA CELBIO-RND DENTRO DA CAMIND A-RN. ....	39
5.1.1 Análise dos detectores passivos antes do experimento com as Drosophila melanogaster .....	39
5.1.2 Análise do comportamento da concentração do radônio durante o experimento com as Drosophila melanogaster nos detectores passivos.....	42
5.2 CERTIFICAÇÃO DO VALOR ENCONTRADO NO CR-39 COM A CÂMARA DE DIFUSÃO PASSIVA.....	45
5.3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTOCOLO PARA CRIAÇÃO DAS DROSOPHILA MELANOGASTER NO DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR .....	46

5.5 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FENÓTIPICAS.....	47
<b>5.5.1 Análise do tamanho do corpo .....</b>	<b>47</b>
<b>5.5.2 Análise na asa.....</b>	<b>48</b>
5.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	53
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O urânio é um dos principais contribuintes para a radioatividade natural da Terra, com a quinta maior reserva geológica do mundo em urânio, o Brasil tem aproximadamente 300 mil toneladas de urânio, que estão distribuídas em alguns estados do Brasil, na Bahia, Ceará, Minas Gerais, Pará, e outros depósitos (Silva, 2021).

O urânio tem tendência de permanecer próximo à superfície da Terra, e está fortemente ligado ao oxigênio. Ocorre naturalmente em solos, rochas e água. Também pode ser encontrado em fontes antropogênicas, incluindo, resíduos de minas, cinzas volantes de usinas térmicas a carvão mineral e uso militar. O urânio é classificado como um elemento actínideo e possui três isótopos naturais, sendo o isótopo predominante  $^{238}\text{U}$ , com 99,27%, enquanto o  $^{235}\text{U}$ , representando 0,72%, e o  $^{234}\text{U}$ , com apenas 0,0057% (Smedley, 2022).

Os radionuclídeos de ocorrência natural dominantes são o urânio ( $^{238}\text{U}$ ), tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e potássio ( $^{40}\text{K}$ ). Estes radionuclídeos são todos de origem primordial, produzindo outros radioelementos pelo processo de decaimento radioativo, emitindo radiações ionizantes do tipo  $\alpha$  e  $\beta$  nas transmutações dos núcleos, até atingirem radionuclídeos estáveis (Bezuidenhout, 2019).

Os radionuclídeos derivados do decaimento do urânio emitem energia em forma de radiação ionizante, por meios de partículas, alfa, beta e/ou emissão de radiação eletromagnética do tipo gama, que podem resultar em danos à saúde humana (Silva, 2021). Dentre os filhos do  $^{238}\text{U}$ , são destaques o  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{222}\text{Rn}$  (Bezuidenhout, 2019).

O radônio é um gás radioativo, pertencente ao grupo dos gases nobres, cerca de oito vezes mais denso que o ar atmosférico, emissor alfa e naturalmente formado pelo decaimento das séries do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  (Corrêa, 2011), sendo o isótopo  $^{222}\text{Rn}$  de maior relevância dosimétrica.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) 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 (WHO, 2009). Tal doença é uma das neoplasias malignas mais comuns e uma das principais causas de mortes em todo o mundo, com tendência a aumentar a incidência mundial em 2% ao ano (Rodrigues *et al*, 2021).

As principais vias de exposição do radônio são inalação e ingestão de água, podendo promover, principalmente em áreas com altos níveis de radioatividade de fundo, efeitos estocásticos e determinísticos nos seres humanos (ICRP, 1993), o que justifica a priorização do

estudo desse gás, principalmente em ambientes internos, localizados em áreas com Material Radioativo de Ocorrência Natural (NORM) em níveis diferenciados.

A investigação dos efeitos do radônio em sistemas biológico, pode contribuir para minimizar o tempo de respostas em estudos dosimétricos, sob condições controladas e geralmente com menor custo, evidenciando os efeitos da emissão da radiação alfa no organismo biológico, como realizado em estudos utilizando-se da espécie *Drosophila melanogaster*, para entender os efeitos genéticos, que são as alterações no material genético que podem provocar mutações e aberrações cromossômicas, e os efeitos acumulados de forma prolongada em gerações expostas ao gás radioativo (Tavera,2002).

As moscas da espécie *Drosophila melanogaster*, também conhecidas como mosca da fruta, apresentam importante relevância no setor da pesquisa científica. Possuem diversas características que facilitam o cultivo e aplicação, como: curto ciclo de vida, dimorfismo sexual e atingindo em 12 horas sua maturidade sexual, além de um genoma pequeno, distribuído em 8 cromossomos, sendo 3 pares de autossomos e 1 par sexual (XX ou XY) que, no total, contém aproximadamente 13.600 genes, sendo praticamente a metade do número de genes conhecidos em humanos (Adams et al., 2000).

Possuem um grande número de descendentes, em torno de 150 a 200 por fêmea, baixo custo de manutenção e fácil manejo em laboratório, são facilmente anestesiadas e compartilham de mecanismos moleculares básicos com os dos mamíferos, o que permite certo grau de extrapolação para seres humanos (Snustad; Simmons, 2008). Portanto, essa espécie possui potencial para ser utilizada como bioindicador de exposição no que se refere aos efeitos biológicos radioinduzidos pelo gás radônio.

Diante do potencial risco associado ao gás radioativo em ambientes internos, modelos *in vivo*, simulados e/ou empíricos possibilitam inferir riscos, principalmente em áreas impactadas por níveis elevados de urânio e tório, buscando mecanismos para mitigar ou erradicar os efeitos biológicos decorrentes da exposição.

Neste viés, o estudo propõe analisar a espécie *Drosophila melanogaster*, no seu ciclo de vida e gerações, fazendo uso de ambiente controlado com níveis elevados de urânio, buscando analisar os efeitos biológicos decorrentes da exposição ao gás radônio.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos biológicos radioinduzidos no organismo modelo *Drosophila melanogaster*, após a exposição ao gás radônio, proveniente de um ambiente controlado com níveis elevados de urânio.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir uma célula bioindicadora para monitoração de radônio em ambientes internos, por sigla definida como: CelBio-RnD, onde a *Drosophila melanogaster*, foram cultivada.
- Monitoramento da câmara de radônio, a CamInd- $\alpha$ Rn com as CelBio-RnD utilizando de detectores passivos do tipo CR-39 e câmara de difusão passiva.
- Estabelecer protocolo de criação da *Drosophila melanogaster* no Departamento de Energia Nuclear da UFPE.
- Analisar as características fenotípicas da *Drosophila melanogaster* expostas ao gás radônio e grupo controle.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 RADIOATIVIDADE NATURAL

A radioatividade natural está presente desde a formação do planeta Terra, onde o meio ambiente, naturalmente já apresenta elementos radioativos naturais, capazes de influenciar na saúde do ser humano, podendo desencadear doenças, e até processos cancerígenos (Oliveira et al., 2012).

As rochas possuem diversos minerais, considerados pesados e resistentes, que contém radionuclídeos primordiais, como o urânio (U), tório (Th) e seus descendentes, somada a contribuição do potássio (K), com forte impacto na contribuição do radônio, principalmente o isótopo  $^{222}\text{Rn}$ , descendente da série radioativa do  $^{238}\text{U}$  (Nelson et al., 2015).

A presença de radiação ionizante na vida humana é derivada de fontes naturais e artificiais, sendo a exposição aos radionuclídeos sujeita as diretrizes estabelecidas por órgãos regulamentadores para garantir a segurança da população. De acordo com o Conselho Nacional de Proteção e Medição de Radiação (NCRP), a radiação natural contribui com cerca de 82% de toda exposição à radiação ionizante a qual a população está exposta, sendo, 55% desta radiação proveniente do radônio. As fontes artificiais, como os raios-X médicos, a medicina e indústrias nucleares, contribui com 18% da exposição total (Bolus, 2013, Bonotto, 2004).

A radioatividade natural tem origem na radiação cosmogênica, que é produzida por radioisótopos formados na atmosfera, os elementos radioativos naturais existentes no mundo, estão presentes na crosta terrestre desde a sua origem, a 4,5 bilhões de anos, sendo os mais importantes do ponto de vista da investigação radioativa, as séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ , assim como o  $^{40}\text{K}$  (Bonotto, 2004, Santos, 2010). A série do  $^{235}\text{U}$  não apresenta relevância para dosimetria ambiental, considerando sua baixa abundância isotópica, que influencia diretamente nos níveis dos seus descendentes no meio ambiente, dentre os radioisótopos naturais, o  $^{222}\text{Rn}$  se destaca devido a sua maior abundância isotópica e a meia vida física, quando comparadas com seus outros isótopos.

#### 3.2 RADÔNIO

O radônio é um gás inerte natural, que se origina do rádio, presente nas séries de decaimento do urânio e do tório, estando presentes em rochas, solos e minerais (Selinus, 2005). Pelo decaimento dos isótopos do rádio:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  e  $^{223}\text{Ra}$ , são formados os isótopos do

radônio:  $^{222}\text{Rn}$ , com meia-vida de 3,82 dias, torônio,  $^{220}\text{Rn}$ , meia-vida de 55,6 segundos e actinônio,  $^{219}\text{Rn}$ , de meia-vida de 3,96 segundos. Todos são emissores de partículas alfa, e através dessas desintegrações produzem isótopos do Po, que por sua vez, seguem o decaimento, até os isótopos estáveis do Pb (Afonso, 2009).

O isótopo mais importante do ponto de vista radioativo, formado da série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  é o gás  $^{222}\text{Rn}$  (Nadaleti et al., 2016), além de sua progênie, principalmente os isótopos  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$ , que também emitem partículas alfa que, quando inaladas, irradiam todo o trato respiratório.

Pelo fato de o radônio ser um elemento emissor de radiação alfa, quando inalado ou ingerido pode oferecer riscos à saúde humana e provocar doenças degenerativas, inclusive doenças nos pulmões, fígado e rins (Queiroz et al., 2017).

Inclusive, a concentração desse gás em determinado órgão, como exemplo o pulmão, apresenta grande potencial de ação cancerígena, ocorrendo pela desintegração de seus descendentes radioativos no próprio organismo do indivíduo (EPA, 2016).

No contexto, o ser humano está exposto ao radônio de diversas maneiras, pois este gás é emanado de rochas e solos, se fazendo presente em todos os lugares, com maior concentração em ambientes fechados e pouco ventilados, como minas subterrâneas ou edifícios (WHO, 2009). Esse gás entra nos interiores das construções, através de rachaduras em pisos e paredes, juntas de edifícios, e vãos em pisos suspensos, ficando retido nesses ambientes e podendo se acumular a níveis elevados, ampliando o risco à saúde da população (WHO, 2009, EPA, 2016). A migração do radônio, ocorre principalmente por difusão através dos poros das rochas, solos, falhas e fissuras, bem como por dissolução nas águas subterrâneas e superficiais (Bonotto, 2008).

Existe um cuidado para sociedade em relação ao  $^{222}\text{Rn}$ , pelo fato de ser uma das fontes de radiação ionizante de origem natural em que o ser humano está mais exposto, considerado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), como o segundo maior causador de câncer de pulmão, depois do cigarro (WHO, 2009). Por ser facilmente encontrado em rochas, solos e água, este gás é liderado pelo ar por meio da interação dos minerais com o solo e a água, se promovendo na atmosfera em sistema de bolhas (IAEA, 2015).

Existem órgãos internacionais que estabelecem limites de exposição ao radônio, para garantir segurança à população, segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 1993), recomendam que os níveis de referência para  $^{222}\text{Rn}$  no ar das moradias sejam de  $148 \text{ Bq/m}^3$  e  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Para WHO (2009), os limites recomendados estão entre 100 a  $300 \text{ Bq/m}^3$ , e o limite estabelecido pela ICRP 126 (2014), leva em consideração a coexistência de

peessoas em uma mesma área geográfica, movendo-se diariamente entre diferentes locais, estabelecendo o valor de  $300 \text{ Bq/m}^3$ , isso levando em consideração os edifícios, escolas, escritórios, restaurantes, que são ambientes frequentados tanto pelo público como os próprios trabalhadores.

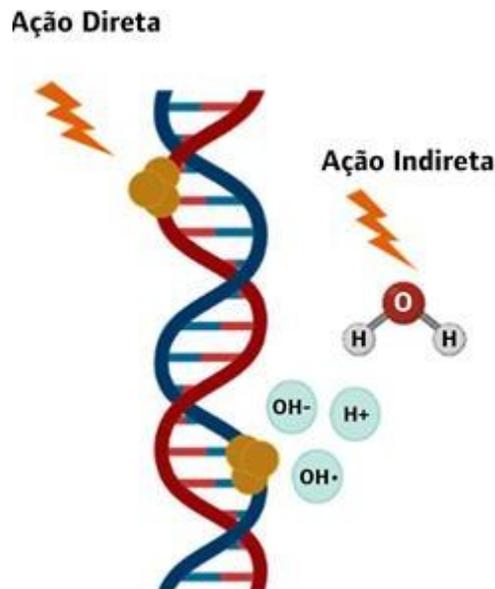
Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA, 2016), o radônio é a segunda causa de câncer de pulmão nos Estados Unidos, devido sua inalação, atrás apenas do câncer provocado pelo cigarro, ocasionando mais de 20.000 mortes por ano. O  $^{222}\text{Rn}$  pode potencializar outras doenças como a leucemia, tumores, problemas cardiovasculares, queda de cabelo, diminuição da expectativa de vida, e mutações genéticas.

### 3.3 EFEITOS BIOLÓGICOS RADIOINDUZIDOS

A interação da radiação com a célula é um fenômeno complexo que tem sido bastante estudado ao longo de décadas. Ao interagirem com o organismo vivo, as radiações ionizantes ionizam átomos e moléculas, desencadeando uma série de eventos nas células vivas. Essas interações podem ter consequências significativas nos sistemas biológicos, levando a diversos efeitos biológicos (Rezende, 2022).

A interação das radiações ionizantes com a célula ocorre principalmente por dois mecanismos: direto e indireto. Conforme ilustrado na Figura 1, no mecanismo direto, as radiações colidem diretamente com as biomoléculas, provocando danos diretamente na molécula do DNA. Já no mecanismo indireto, as radiações interagem primeiramente com as moléculas de água, gerando radicais livres. Esses radicais livres podem, por sua vez, reagir com as biomoléculas, ocasionando danos secundários, como lesões no DNA (Oliveira *et al.*, 2022).

Figura 1 - Mecanismo de ação direta e indireta da radiação



Fonte: Oliveira *et al* (2022) Representação esquemática dos efeitos diretos e indiretos da radiação no DNA e os tipos de danos que essas interações podem causar na molécula. Na ação direta, a radiação danifica o DNA sem intermediários; na ação indireta, a radiação interage com a molécula de água produzindo radiólises da água e assim danificando o DNA.

Os efeitos biológicos oriundos da exposição as radiações ionizantes podem ser expressos de diversas formas, pelos efeitos somáticos, determinísticos e genéticos. Os efeitos somáticos são os danos causados diretamente aos tecidos e células do organismo exposto à radiação. Esses efeitos afetam as células somáticas, ou seja, aquelas que formam os tecidos e órgãos do corpo, e podem se manifestar de diferentes formas, dependendo da dose e da duração da exposição à radiação, existem dois tipos principais de efeitos somáticos (Reisz et al., 2014):

- Efeitos somáticos imediatos (ou agudos): Esses efeitos ocorrem logo após uma exposição intensa e repentina à radiação, geralmente associada a altas doses. Exemplo é a Síndrome de Radiação Aguda, que pode levar a sintomas como náuseas, vômitos, queda de cabelo, queimaduras na pele, distúrbios hematológicos (como redução de glóbulos vermelhos e brancos), e danos aos órgãos internos.
- Efeitos somáticos tardios (ou crônicos): Esses efeitos aparecem após um longo período da exposição, muitas vezes anos ou até décadas depois da radiação. São exemplos de efeitos tardios: o desenvolvimento de câncer (como leucemias ou câncer de pulmão), catarata ocular, doenças cardiovasculares, e danos ao sistema imunológico.

(Reisz et al., 2014).

Os efeitos determinísticos da radiação ionizante são aqueles cujas consequências

dependem diretamente da dose de radiação recebida. Diferentemente dos efeitos estocásticos, os efeitos determinísticos têm uma relação dose-resposta clara e a gravidade dos sintomas aumenta conforme a quantidade de radiação aumenta. Além disso, esses efeitos tendem a ocorrer somente após a exposição a doses acima de um certo limiar e têm um início previsível após a exposição (Oliveira et al., 2022).

Os efeitos genéticos da radiação ionizante referem-se aos danos causados ao material genético (DNA) das células germinativas (óvulos e espermatozoides), que podem ser transmitidos para a descendência. Esses efeitos ocorrem quando a radiação ionizante altera o DNA das células germinativas, resultando em mutações que podem ser herdadas pelas futuras gerações (Reisz et al., 2014).

A interação da radiação com a célula é um campo de estudo fundamental para a proteção radiológica, e para a compreensão dos riscos associados à exposição à radiação, os efeitos biológicos das radiações ionizantes dependem de diversos fatores, incluindo o tipo de radiação, a dose, a sensibilidade individual e a duração da exposição (Rezende, 2022).

A pesquisas contínuas é essencial para o desenvolvimento de estratégias de segurança e aprimoramento da gestão de riscos relacionados à radiação em ambientes médicos, industriais e nucleares. Portanto, a incorporação de bioindicadores na avaliação da exposição à radiação é uma prática fundamental para a segurança dos indivíduos e a proteção da saúde pública (Silva, 2020).

### **3.3.1 Medidores de radônio**

Os detectores que são usados para investigar os níveis de radioatividade de determinado local, ou monitorar indivíduos ocupacionalmente expostos, devem garantir medições precisas, confiáveis, e caracterizar as condições de riscos. Para determinação da concentração do radônio nos ambientes internos podemos usar dispositivos para o monitoramento, sendo passivo ou ativo, os de caráter passivo são os que não necessita de energia para realizar amostragem, e os ativos, são os que necessita de uma fonte de energia, entretanto proporciona o registro durante todo período de exposição de maneira contínua, registrando as variações que possam ocorrer (Santos, 2022).

Dependendo da aplicação do tipo de monitoramento, e da metodologia aplicada a pesquisa, o tempo de exposição pode variar, pelo fato de alterações sazonais que podem influenciar na concentração do radônio no ambiente interno, existem alguns dispositivos que são utilizados para medição do radônio, oferecendo medições em longo prazo, segundo WHO

(2007) existem os Detector de Traços de Partículas Alfa (DTPA); Detector de Carvão Ativado (DCA), e a Câmara de Ionização Eletrônica (CIE), que são detectores passivos e o Monitor Contínuo de Radônio (MCR), um detector ativo, com isso, para realizar o monitoramento do ambiente, dentre esses dispositivos o que se destaca são os DTPA.

Os Detectores de Traços de Partículas Alfa (DTPA) são amplamente recomendados para a medição de radônio em estudos de longa duração devido a suas características técnicas e econômicas. Esses dispositivos apresentam baixo custo, o que reduz significativamente o impacto financeiro em caso de perdas durante os experimentos. Além disso, sua facilidade de uso e a possibilidade de operar com grande número de detectores simultaneamente tornam-nos especialmente adequados para estudos de ampla escala. Essa versatilidade é particularmente útil para a monitoração de ambientes contendo Materiais Radioativos Naturalmente Ocorrentes (NORM), onde a presença de radônio pode variar em extensão e concentração, por isso os DTPAs oferecem uma solução prática e eficiente para a avaliação contínua e confiável da radiação em diferentes contextos, como destacado por Oliveira (2017).

E para o registro dessas partículas alfas é usado O CR-39, é um dispositivo de traço nuclear do estado sólido (SSNTD, do inglês Solid State Nuclear Track Detector), é um polímero do tipo policarbonato de nomenclatura Di Alil Carbonato de Dietileno Glicol, com composição química molecular  $C_{12}H_{18}O_7$ . Este polímero tem formato quadrado, com laterais medindo 3,0 cm. Sua principal característica é a capacidade de registrar a interação das partículas alfa em uma ampla gama de energias, variando da ordem de keV a dezenas de MeV. Isso permite que o CR-39 seja usado como um espectrômetro alfa (Santos, 2022).

Além da câmara de difusão passiva, outro tipo detector de radônio, da marca Air Things, modelo Corentium Home, é um detector digital de radônio amplamente reconhecido por sua tecnologia confiável, baseada em espectrometria alfa, recomendada por profissionais da área. Portátil e alimentado por 3 pilhas AAA com autonomia de até dois anos, o dispositivo mede concentrações de radônio de 0 a 500 pCi/L (0 a 9999 Bq/m<sup>3</sup>) com precisão de  $\pm 10\%$  após 7 dias e  $\pm 5\%$  após dois meses. Compacto (12 cm  $\times$  8 cm  $\times$  2,5 cm) e leve (130 g), opera em temperaturas entre 4°C e 40°C e umidade relativa inferior a 85%. Seu monitoramento contínuo permite verificar níveis médios de radônio a curto e longo prazo diretamente na tela. O Corentium Home também facilita a geração de relatórios automáticos, promovendo a detecção precoce de concentrações elevadas de radônio, principal causa de câncer de pulmão em não fumantes, garantindo praticidade, economia e segurança para ambientes residenciais (AIRTHINGS, 2024).

### 3.4 BIOINDICADORES DE EXPOSIÇÃO À RADIAÇÕES IONIZANTES

Os bioindicadores são espécies biológicas essenciais para o monitoramento e avaliação de condições ambientais. Essas espécies desempenham um papel fundamental ao fornecer informações relevantes sobre a qualidade de um ecossistema ou o impacto de atividades antrópicas. Quando expostas a determinadas condições ambientais ou a influências humanas, os bioindicadores respondem de maneira observável, manifestando alterações fisiológicas, comportamentais ou populacionais que refletem a situação ambiental à qual foram submetidos (Callisto et al., 2005).

As respostas extraídas dos bioindicadores estão correlacionadas às alterações ambientais ou riscos para os seres vivos, que modificam as funções vitais desse organismo, expressando de maneira significativa as alterações ocorridas em resposta à situação ambiental em que foram expostos (Kapusta, 2016).

Existem vários tipos de bioindicadores que contribuem para fornecer informações relevantes na ecologia, e no monitoramento de ecossistemas, para garantir o controle ambiental e a saúde da população. Das diversas espécies de seres vivos que podem ser utilizadas como bioindicadores estão presentes as plantas, insetos, besouros, minhocas, musgos, líquens e anfíbios (Prestes; Vincenci, 2019).

Um exemplo de bioindicadores são as *Drosophila melanogaster* que desempenham um papel crucial como bioindicadores, oferecendo uma perspectiva única pela sensibilidade a diferentes condições ambientes (Silva, 2020).

As *Drosophila melanogaster*, também conhecida como mosca da fruta, é um inseto holometábolo, encontradas em frutos em estado de putrefação (Teles, 2014), com rápido ciclo de vida. As fêmeas, após uma única fecundação, produzem dezenas de descendentes em 10 dias, apresentando grande vantagem para pesquisa, possibilitando avaliar suas características e modificações em curto tempo. O primeiro dia do ciclo, é o suficiente para o aparecimento das larvas, iniciando os três estágios até formar a pupa. A eclosão do indivíduo adulto, o recém emergente, leva cerca de 10 dias após a oviposição, sendo necessárias de 5 a 8 horas para as fêmeas se tornarem férteis e mais de 8 horas para os machos, considerados para uma temperatura do ambiente em torno de 25°C (Roote, 2013; Keller, 1996; Ashburner, 1993). Em ambientes mais frio, e.g. 18°C, o ciclo pode chegar até 19 dias, ao passo que, em condições com o ambiente mais quente, e.g. 28°C, o ciclo de embrião/ovo até adulto tem uma média de 7 dias, tornando esse animal altamente sensível à temperatura e ao ambiente externo (Santos, 2020). Após atingirem a fase adulta, a espécie apresenta uma expectativa média de vida em cerca de 60 dias

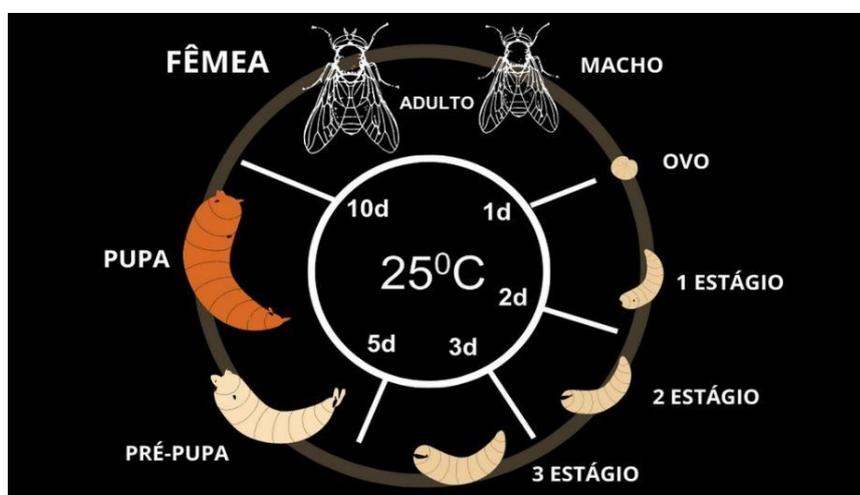
(Roote, 2013; Keller, 1996; Ashburner, 1993).

O ciclo de vida das moscas, como na maioria dos insetos, é dividido em dois períodos, sendo o período embrionário, que ocorre no interior do ovo, desde o momento da fertilização até à eclosão da jovem larva. O período pós-embrionário, que ocorre após a eclosão do ovo, está dividido em três estágios: larva, pupa e adultos, onde no primeiro estágio a larva se alimenta efetivamente, na pupa não se alimenta, permanecendo na forma imóvel, e no adulto é possível observar asas desenvolvidas e a maturidade sexual (Almeida, 2015).

A Figura 2 ilustra o ciclo de vida da *Drosophila melanogaster*, que é composto por cinco principais estágios de desenvolvimento. O ciclo inicia-se com o ovo. Durante esse estágio, as larvas passam por três fases distintas, denominadas primeiro, segundo e terceiro estágios larvais, caracterizadas por intenso crescimento e alimentação.

Posteriormente, ocorre a transição para a pré-pupa, momento em que a larva cessa sua alimentação. Em seguida, a pupa que marca o período de metamorfose completa, no qual ocorre a reorganização dos tecidos para formar o organismo adulto. Finalmente, emerge o adulto, fase reprodutiva que completa o ciclo de vida da espécie.

Figura 2 - Ciclo de vida das *Drosophila melanogaster*



Fonte: Adaptada de TELES (2014).

A *Drosophila*, por apresentar um genoma 60% semelhante ao do ser humano, vêm sendo usadas como modelo biológico, visando avaliar o efeito tóxico-genético de substâncias nocivas ao genoma, em ensaios *in vivo* e *in vitro*, onde o ensaio cometa está sendo bastante utilizado (Siddique et al., 2005), e as moscas cada vez mais estão sendo usadas em testes de genotoxicidade (Gaivão, Sierra, 2014), tendo em vista que a modificação no material genético pode ocasionar diversos efeitos biológico no corpo humano, tais como inibição do crescimento,

perturbação na reprodução, ou surgimento de tumores (Ohe et al., 2004).

O seu genoma encontra-se distribuído em 8 cromossomos, sendo 3 pares de autossomos e 1 par sexual (XX ou XY) (Johnston, 2002) que, no total, contém aproximadamente 13.600 genes, sendo praticamente a metade do número de genes conhecidos em humanos. Os adultos maduros de *Drosophila melanogaster* possuem olhos de tonalidade castanho-amarelada e apresentam dimensões aproximadas de 3 milímetros de comprimento por 2 milímetros de largura (Adams et al., 2000). Devido à sua semelhança genética e fisiológica com os seres humanos, essa espécie tem grande relevância para a pesquisa científica (Rand, 2010).

Atualmente, *Drosophila melanogaster* é amplamente utilizada como modelo em estudos sobre câncer, devido à sua capacidade de fornecer informações sobre os mecanismos moleculares da doença (Beckingham et al., 2005; Villegas, 2019). Além disso, as *Drosophila melanogaster* foram pioneiras como modelo em estudos de genotoxicidade, sendo empregadas pela primeira vez para investigar os danos causados ao DNA pela radiação ionizante (Müller, 1927).

As mudanças que ocorrem no material genético das *Drosophila* é caracterizado pelo genótipo, um conjunto de genes presente no organismo, contendo as informações hereditárias que são transmitidas para os descendentes. Este genótipo é influenciado pelo ambiente em que o indivíduo se encontra. Por exemplo, se o indivíduo está exposto a altos níveis de sol, poluição, ou qualquer outro fator ambiental, isso pode interferir no seu desenvolvimento e ter efeitos futuros. E todos esses fatores juntos influenciam e determinam o fenótipo do indivíduo (Amabis, 2010).

Entre os aspectos avaliados em estudos de desenvolvimento e adaptação, destacam-se as características fenotípicas, que correspondem a resposta da expressão do gene, junto com a interação do meio ambiente, com destaques para as características físicas, morfológicas e comportamentais (Brito, 1997).

Segundo Teles e colaboradores 2014, quando o gene da *Drosophila melanogaster* passa por quaisquer alterações, o material genético segue pelas gerações futuras carregando essas informações, o que assegura a eficiência da espécie como bioindicadora, principalmente para investigação de danos ocasionados pela exposição aos agentes radioativos, dada a possibilidade de manifestação de danos em seus descendentes.

Há mais de 50 anos a *D. melanogaster* vem sendo utilizada em pesquisas científicas para avaliar e monitorar danos ao DNA (Nepomuceno, 2015), em vista de apresentar mecanismos moleculares básicos semelhantes aos dos mamíferos, o que possibilita a observação para os seres humanos.

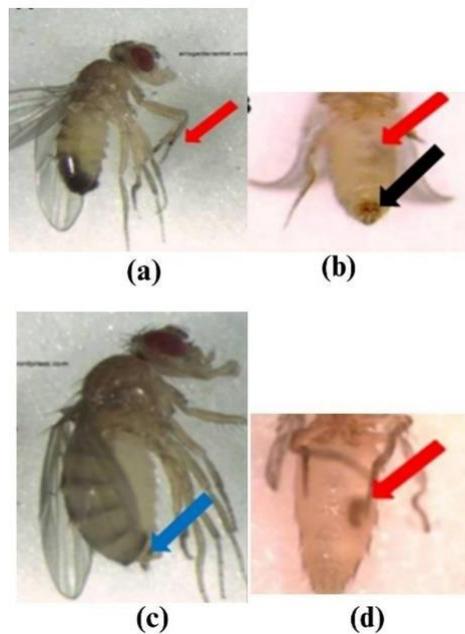
As *Drosophila melanogaster* com cor de olhos brancos, foi a primeira mutação ligada ao sexo, descoberta em 1910 por Thomas Morgan, que coletou o único macho mutante de olhos brancos de uma população das *Drosophila melanogaster*, que geralmente apresenta olhos de cor vermelho-tijolo escuros. Ao realizar o cruzamento do macho com moscas fêmeas do tipo selvagem, ele observou que na primeira geração (F1) e segunda geração (F2), sempre esteve presente machos com olhos brancos. Esses cruzamentos feitos por Morgan levaram acreditar que esse fator estava ligado ao sexo, onde esse gene era encontrado no cromossomo sexual, cuja mutação foi chamada de *branco* (Morgan, 1910). Alias é uma mutação bastante utilizada como modelo para doenças neurodegenerativas, principalmente Doença de Alzheimer (Santos, 2020).

Estudos indicam que a exposição de *Drosophila melanogaster* ao radônio resulta em alterações significativas. Pimentel e colaboradores (1996) forneceram dados experimentais sobre os efeitos do radônio em baixas doses, variando de 0,03 a 3,18 mGy, em *Drosophila melanogaster* durante o período larval. Essas doses induziram mutações e recombinação em suas células somáticas. Foi observado que a exposição ao radônio afetou a fecundidade das moscas, sendo que a prole tratada apresentou uma fecundidade significativamente menor em comparação com os grupos de controle. Além disso, a capacidade de reprodução e formação de gametas foi afetada, com danos observados nas células germinativas, que são mais sensíveis. Os resultados sugerem que a exposição ao radônio causou danos letais em *D. melanogaster*. Há também evidências substanciais de que a exposição à radiação ionizante resulta na produção de aberrações cromossômicas.

Para distinguir entre machos e fêmeas de *Drosophila melanogaster*, são observadas características claramente distintas, facilitando a identificação no processo de seleção, especialmente em indivíduos recém-emergidos. Conforme indicado na Figura 3, as fêmeas apresentam um ovipositor na extremidade do abdome (seta azul, Figura 3C), que é a principal característica utilizada para diferenciá-las. Em contraste, os machos exibem, no final do abdome, uma estrutura com formato semelhante a uma flor (seta preta, Figura 43B) (Roote, J.; Prokop, A. 2013).

Além disso, os machos e as fêmeas podem ser facilmente separados devido ao dimorfismo sexual evidente. As fêmeas (Figura 3C) são maiores e possuem listras abdominais em tons mais claros. Já os machos (Figura 3A) são menores, com listras mais escuras concentradas no final do abdome. Outro diferencial nos machos é a presença de uma estrutura pilosa denominada pente sexual, localizada no primeiro par de patas (seta vermelha, Figura 3A), que auxilia na distinção do sexo (Roote, 2013).

Figura 3 - Dimorfismo sexual das *Drosophila melanogaster*



Fonte: adaptado de TELES (2014)

<sup>(a)</sup>Macho de *Drosophila melanogaster* com pente sexual visível (indicado pela seta vermelha). <sup>(b)</sup>Macho apresentando a estrutura característica no final do abdome (indicado pela seta preta). <sup>(c)</sup>Fêmea adulta com ovipositor visível (indicado pela seta azul). Diferença de tonalidade abdominal entre machos<sup>(b)</sup> e fêmeas<sup>(d)</sup> virgens recém-emergidos (indicado pela seta vermelha).

A diferenciação entre fêmeas virgens e machos logo após a eclosão pode ser feita pela observação do abdome. As fêmeas apresentam um tom mais claro e uma mancha herdada do estágio de pupa não defecante (Figura 3D, seta vermelha). Em contraste, os machos têm um abdome mais escuro, tornando essa mancha menos evidente (Figura 3B, seta vermelha) (Teles, 2014).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Radioecologia e Controle Ambiental (LARCA) do Departamento de Energia Nuclear do Centro de Tecnologia e Geociências – Escola de Engenharia de Pernambuco, da Universidade Federal de Pernambuco.

A pesquisa consistiu na avaliação fenotípica num grupo de *Drosophila Melanogaster*, a mosca da linhagem *Selvagem*, conforme apresentado no fluxograma na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma estrutural da pesquisa



Fonte: O autor (2023).

No experimento, foi avaliados os indivíduos adultos oriundos das linhagens do acasalamento entre os machos e fêmeas de cada grupo. Cada grupo experimental exposto ao radônio possui um grupo controle, sem exposição ao gás radioativo, que servirá para validar as possíveis alterações que surgirem nos descendentes.

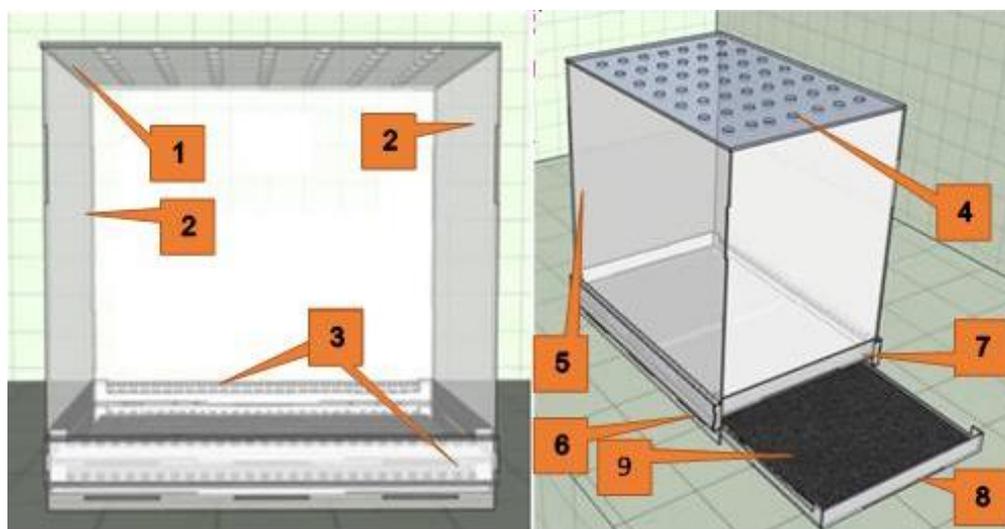
### 4.1 EXPOSIÇÃO DAS *DROSOPHILA MELANOGASTER* AO RADÔNIO

As *Drosophila*, foram expostas ao Radônio desde o estágio larval ao adulto, em uma câmara de radônio (CamInd  $\alpha$ -Rn), apresentada na Figura 5, que foi um instrumento

metodológico construído no trabalho de mestrado do Grupo de Radioecologia (RAE) da UFPE (Guimarães, 2022).

A CamInd  $\alpha$ -Rn apresenta estrutura em material acrílico transparente, incolor, rígido, com dimensões externas de 60 cm de comprimento; 43,2 cm de largura e 61 cm de altura, resultando em um volume útil de aproximadamente 158 cm<sup>3</sup>, e que contém massa de Material Radioativo de Ocorrência Natural (NORM), com produção de radônio numa atividade média de  $3.200 \pm 324$  Bq.m<sup>-3</sup>. A amostra do material radioativo presente na câmara foi extraída de uma rocha, que apresenta anomalia de urânio, e coletada de uma superfície rochosa, contendo alto teor de urânio natural (Guimarães, 2022).

Figura 5 - CamInd  $\alpha$ -Rn



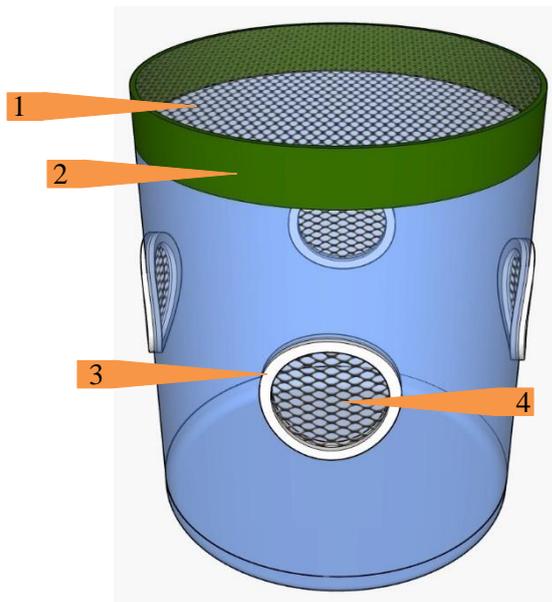
Fonte: GUIMARAES, 2022.

- (<sup>1</sup>) tampa superior articulável (teto); (<sup>2</sup>) parede lateral; (<sup>3</sup>) difusores das paredes frontal e posterior; (<sup>4</sup>) difusores da tampa superior articulável; (<sup>5</sup>) parede frontal; (<sup>6</sup>) defletor fixo da parede frontal; (<sup>7</sup>) piso B; (<sup>8</sup>) piso A; (<sup>9</sup>) amostra fonte do simulador.

#### 4.2 CÉLULA BIOINDICADORA DE RADÔNIO E DESCENDENTES

As Células Bioindicadoras de Exposição ao Radônio e Descendentes em ambientes internos, por sigla definida como: CelBio-RnD, foi construída durante este trabalho, com o objetivo de expor as *Drosophila melanogaster* ao gás radônio dentro dessas células, composta por um recipiente de polietileno transparente (Figura 6), com dimensões de 12,1 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A parte superior foi composta por um tecido tipo tule branco, utilizado como tela para facilitar a dispersão do Rn no interior da célula.

Figura 6 - CelBio-RnD



Fonte: O autor (2024).

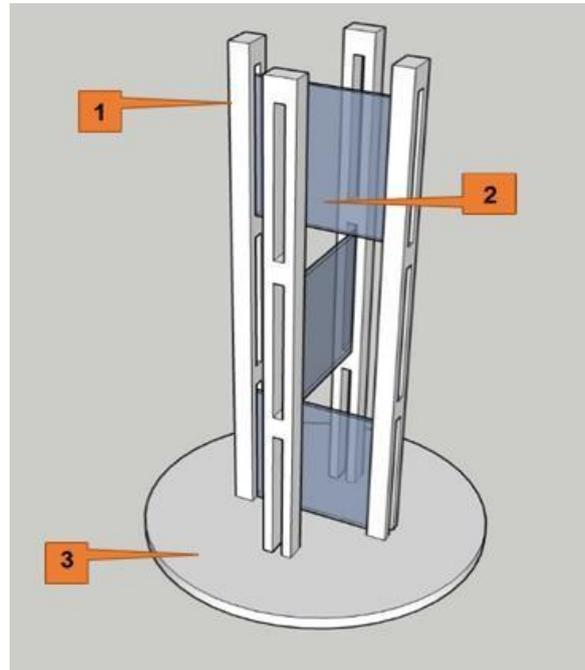
- <sup>(1)</sup> tampa com tecido tipo tule; <sup>(2)</sup> circunferência da remoção da tampa do recipiente para fixar o tecido;  
<sup>(3)</sup> argola para fixar o tecido nas laterais; <sup>(4)</sup> tecido tipo tule.

As janelas foram construídas nas laterais da célula, diametralmente opostas, com circunferência de 3 cm, totalizando 4 (quatro) aberturas. Cada abertura acoplada ao tecido utilizado na região superior, fixados por argolas sob medidas, constituídas de polímero Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), um polímero amorfo, que garante resistência e rigidez a impacto, que foram impressas em impressora 3D pro GTmax3D CORE A2V2, disponibilizada no Laboratório Tecnológico do Grupo de Radioecologia (RAE) da UFPE.

#### 4.3 MONITORAMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO Rn NA CelBio-RnD

A concentração de Rn no interior da CelBio-RnD antes do experimento com as moscas, foi monitorada com detectores passivos, a base de CR-39, utilizando um suporte com 11 cm de altura, integrando três detectores. Conforme pode ser observado na Figura 7, o suporte foi construído da seguinte forma: <sup>(1)</sup> quatro pilares com três aberturas de 3 cm cada, para entradas dos CR-39; <sup>(2)</sup> posicionados perpendicularmente, e uma base com 7 cm de diâmetro; <sup>(3)</sup>. Toda estrutura do suporte é feita de Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), desenvolvida e construída pelo Grupo de Radioecologia da UFPE, usando impressora 3D.

Figura 7 - Suporte para acomodação dos CR-39 dentro dos CelBio-RnD

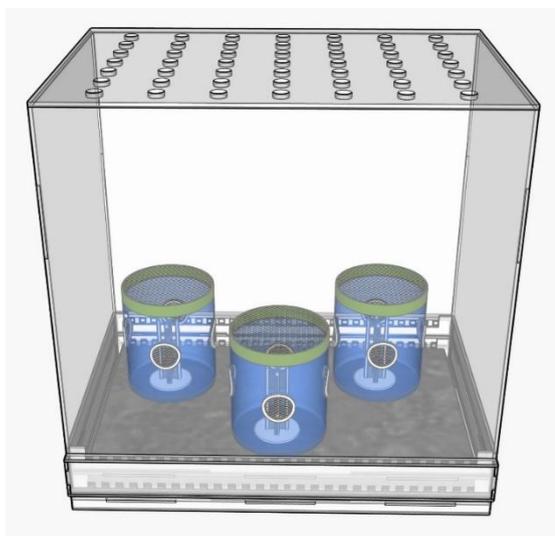


Fonte: O autor (2024).

<sup>(1)</sup> pilares para acomodar os CR-39; <sup>(2)</sup> detectores CR-39; <sup>(3)</sup> base de sustentação do suporte.

Para avaliação inicial da concentração de radônio presente nas CelBio-RnD em que as moscas foram expostas a radiação, o suporte apresentado na Figura 7 foi fixado, individualmente, dentro de três células bioindicadoras, distribuídos em posições diferentes dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn para o monitoramento da atividade do radônio presente no ambiente, conforme Figura 8.

Figura 8 - Monitoramento dos detectores CR-39, acomodados em um suporte, distribuídos em três CelBio-RnD individuais dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn



Fonte: O autor (2024).

Determinação da concentração do radônio presente nas CelBio-RnD para exposição das *Drosophila melanogaster*.

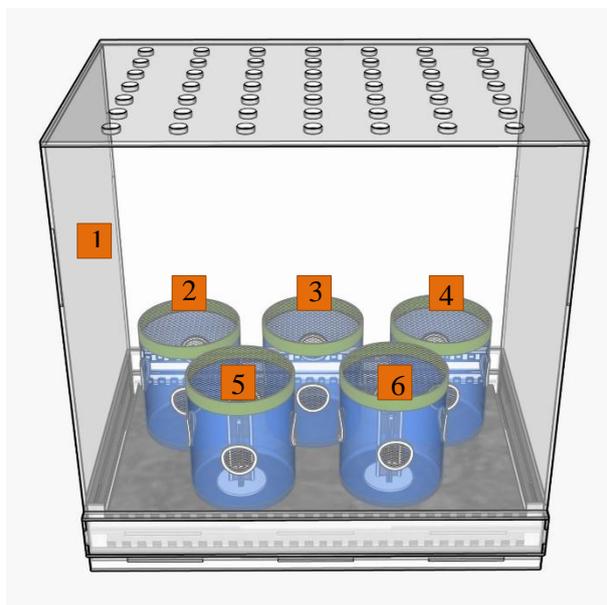
Após a exposição dos CR-39 dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn, os CR-39 foram retirados respeitando o tempo estabelecido para retirada de cada CelBio-RnD, com os dias de 20, 40 e 60, e logo após, submetidos ao processo de revelação e análise, realizado no Laboratório de Radioecologia e Controle Ambiental (LARCA) do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. A técnica de revelação empregada seguiu o método amplamente utilizado por laboratórios e pesquisadores, conforme descrito por Santos (2022).

O processo de revelação os detectores passarão pela avaliação das trilhas nucleares, fazendo uso do microscópio óptico, demonstrado na Figura 11, da marca Leica Microsystems®.

E para realizar a contagem das trilhas nucleares decorrentes da interação da radiação alfa com os CR-39, foi utilizado o Quantikov, software de processamento digital com acesso livre que possibilita a contagem das trilhas nucleares oriundas da interação das partículas alfa com o detector (Pinto, 1996).

Após a determinação da concentração inicial de radônio em cada CelBio-RnD, através do arranjo experimental apresentado na Figura 8 antes da exposição das *Drosophila*, o experimento seguiu a sequência apresentada na Figura 9, onde: (1) estrutura da CamInd  $\alpha$ -Rn, (2), (3) e (4) *Drosophila melanogaster* Selvagem, (5) e (6) detectores CR-39 no suporte, para realizar a monitoração da concentração do radônio dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn durante a exposição das *Drosophila* ao gás.

Figura 9 - Monitoramento com os CR-39 na CamInd  $\alpha$ -Rn, da exposição das *Drosophila* ao radônio durante o experimento



Fonte: O autor (2024).

<sup>(1)</sup> estrutura da CamInd  $\alpha$ -Rn, <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> *Drosophila melanogaster* Selvagem, <sup>(5)</sup> <sup>(6)</sup> detectores CR-39 no suporte dentro da CelBio-RnD .

Durante a exposição das *Drosophila melanogaster* do tipo selvagem, o monitoramento constante foi realizado ao longo do ciclo de vida, até a formação do indivíduo adulto, conforme ilustrado na Figura 9, com o objetivo de avaliar possíveis influências na concentração do radônio decorrentes das manipulações com as moscas realizadas durante os experimentos na CamInd  $\alpha$ -Rn. Quatro detectores CR-39 foram inseridos em duas CelBio-RnD, sendo dois em cada uma, dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn no suporte, para cada CelBio-RnD foi colocado um CR-39 localizado na parte superior e outro na parte inferior, enquanto a região central do suporte permaneceu sem o CR-39. Após o período de exposição, os detectores foram submetidos aos procedimentos de revelação e análise.

A retirada e a análise dos detectores ao longo do experimento foram conduzidas em sincronia precisa com o ciclo de vida das *Drosophila melanogaster*, garantindo que os dados fossem coletados em momentos estratégicos correspondentes ao término do desenvolvimento das gerações F1 e F2. No primeiro experimento, o término foi de 33 e 31 dias, esses dias foram determinados pela aplicação do desenho experimental, apresentado na Figura 14 que inclui a exposição das *Drosophila* ao radônio e simultaneamente posicionado os detectores CR-39 nas CelBio-RnD para monitorar as concentrações de radônio, e o tempo para produção de F1 e F2

se mantiveram consistentes nos outros dois experimentos subsequentes, realizados com a mesma metodologia. A realização dos experimentos feita três vezes, nos garante a reprodutibilidade e confiança dos dados. Essa abordagem metodológica assegurou a coleta de dados representativos e consistentes sobre os efeitos da exposição ao radônio.

Além disso, foi feita uma certificação da concentração do radônio com a câmara de difusão passiva, o Corentium Home que foi colocado no interior da CamInd  $\alpha$ -Rn dentro de uma CelBio-RnD para validação da concentração do radônio, exposta num período de 23 dias para realização da monitoração.

#### 4.4 SELEÇÃO *DROSOPHILA MELANOGASTER*

As *Drosophilas Melanogaster* utilizados para o desenvolvimento dessa pesquisa, foram doadas pelo Laboratório de Genética da Universidade Estadual do Piauí (LABGENE).

Para o acasalamento das *D. melanogaster* selvagem foram utilizados 8 machos e 8 fêmeas virgens, nas Células Bioindicadoras de Exposição ao Radônio e Descendentes (CelBio-RnD) desenvolvidas para o criadouro no LARCA.

##### 4.4.1 Cultivo e manuseio das *Drosophila melanogaster*

A criação das *Drosophila* foi realizada no ambiente com toda infraestrutura e os instrumentos necessários para o cultivo e manuseio das moscas, proporcionado espaço e comodidade para execução das atividades. Quando criadas em laboratórios, as linhagens das *D. melanogaster* foram cultivadas em meio de cultura (500 mL), composto por: banana, água, açúcar (40 g), fermento biológico seco (10 g), farinhas de milho (75 g), aveia (25 g) e centeio (15 g) cozidas por 15 minutos em microondas. Ao término do cozimento foi adicionado Nipagin (1g/mL- diluído em álcool etílico absoluto), ácido fosfórico (3 mL) e propiônico (3 mL), com base em meios de cultura já desenvolvidos pelo departamento de Genética da Universidade Federal de Pernambuco.

A manipulação das *Drosophila melanogaster* foi realizada através da utilização de um algodão embebido em éter, servindo como agente anestésico no manuseio dos espécie por um período aproximado de 10 minutos (Silveira, 2014). Esse procedimento facilita a análise do número de descendentes ao longo do experimento, bem como a identificação de possíveis alterações fenotípicas nos indivíduos observados.

#### 4.4.2 Acasalamento

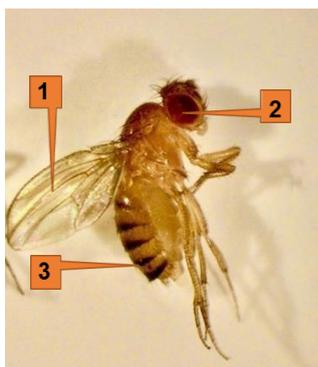
Para os acasalamento, foi selecionado os indivíduos virgens, coletados após a eclosão, para garantir que não houve nenhum acasalamento antes, provenientes da linhagem selvagem das *Drosophila melanogaster*.

Indivíduos selecionados e separados quanto ao gênero e colocados para o acasalamento, sempre respeitando a proporção 1:1 de machos e fêmeas nos respectivos ambientes de cultura, mantidas dentro da câmara de radônio do próprio grupo RAE (CamInd- $\alpha$ Rn). O grupo permaneceu exposto na câmara de radônio por 10 dias, correspondente ao seu ciclo de vida da espécie, estando em ambiente arejado e iluminado, condicionados a temperatura controlada a 25°C. O mesmo aconteceu no grupo controle, ou seja, não exposto ao radônio.

#### 4.4.3 Avaliação das Características Fenotípicas e Medição do Tamanho Corporal das *Drosophila melanogaster*.

Para avaliação das características fenotípicas nas moscas, foram utilizada os indivíduos adultos, para observar as seguintes características, considerando a Figura 10, <sup>(1)</sup> tamanho das asas, o <sup>(1)</sup>formato do corpo· <sup>(2)</sup> cor dos olhos e <sup>(3)</sup> a quantidade de listas presente no corpo.

Figura 10 - Aspectos morfológicos das *Drosophila melanogaster*



Fonte: MICHALSKA *et al.*, (2023)

<sup>(1)</sup> Asas, <sup>(2)</sup> cor dos olhos, <sup>(3)</sup> listas presente no corpo.

De todas as características fenotípicas que podem ser observadas nas *Drosophila melanogaster*, foi estabelecida uma metodologia padronizada, para medição do tamanho corporal, que garantiu precisão e reprodutibilidade dos dados, com o auxílio do microscópio óptico (Figura 11), da marca Leica Microsystems®, modelo DM500®, com ocular de 10x,

iluminação tipo LED de luz refletida, capacidade para quatro objetivas planacromáticas com correção infinita e capacidade fluorescente, acoplado com uma câmara de alto desempenho, também da marca Leica Microsystems®, modelo ICC50 E® (LEICA, 2019).

Figura 11 - Microscópio óptico, marca Leica Microsystems®



Fonte: LEICA (2019)

E com microscópio estereoscópico, Figura 12, que permitiu uma visualização ampliada e um campo de análise mais abrangente das moscas, otimizando o processo.

Figura 12 – Microscópio estereoscópico binocular de óptico, marca Lumen

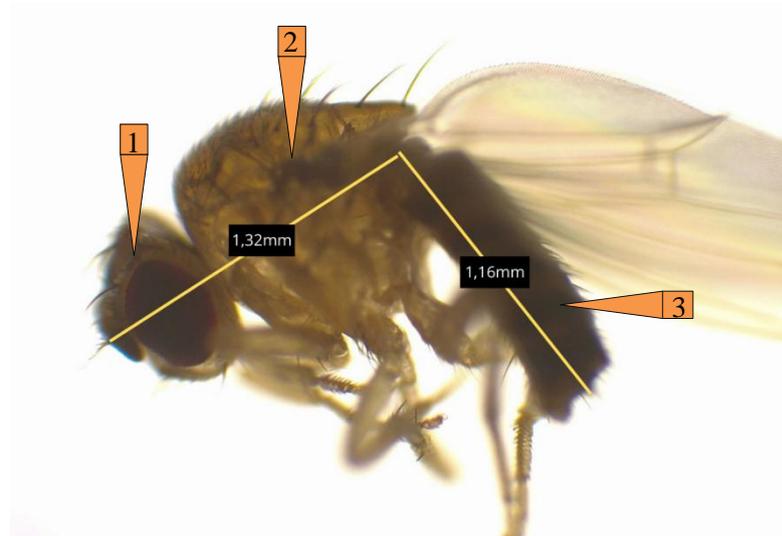


Fonte: LUMEN (2024)

E para assegurar a exatidão das medições realizadas no microscópio óptico (Figura 11), foi empregada uma lâmina de calibração específica. Todo o processo seguiu um padrão uniforme, considerando a mesma objetiva, foco e posicionamento anatômico das *Drosophila*

*melanogaster*. O procedimento incluiu duas medições: a primeira da cabeça ao tórax e a segunda ao longo de todo o abdome como apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Determinação do tamanho do corpo das *Drosophila melanogaster*.



Fonte: o autor (2024).

<sup>(1)</sup> cabeça, <sup>(2)</sup> tórax, <sup>(3)</sup> abdome.

Devido à curvatura natural que as *Drosophila melanogaster* desenvolvem com o passar do tempo, foi estipulado um prazo máximo de 14 dias após a eclosão para o início dos registros das imagens, respeitando o tempo necessário de cada geração.

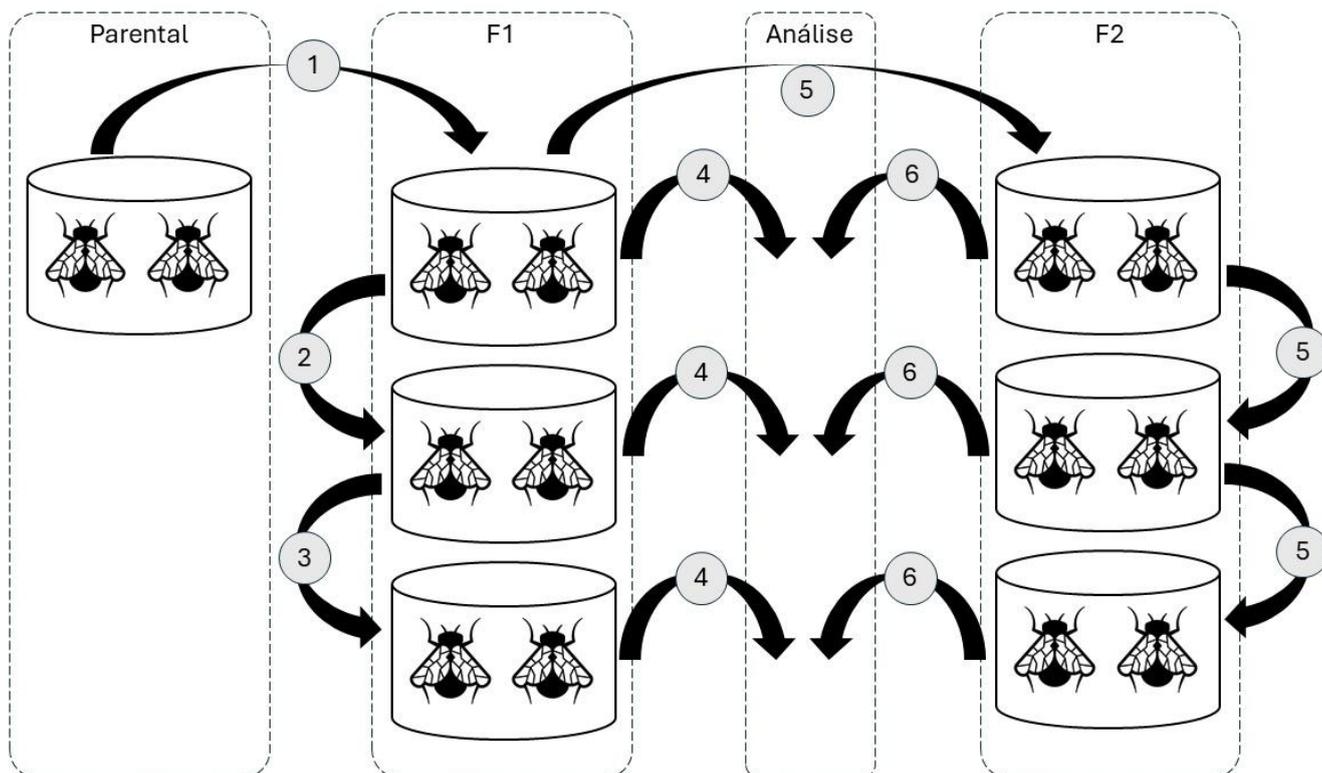
#### 4.5 Desenho Experimental para exposição das *Drosophila melanogaster* na CamInd $\alpha$ -Rn

O desenho experimental para o estudo com as *Drosophila melanogaster* exposta ao radônio e para o grupo controle foi definido com base em estudos prévios realizados pelo Departamento de Genética da Universidade Federal de Pernambuco, reconhecido por suas contribuições relevantes nesse modelo experimental.

O A configuração experimental dividiu os indivíduos em dois grupos principais: (G1A) grupo exposto ao radônio e (G1B) grupo controle (não exposto ao radônio), ambos seguiram o mesmo desenho experimental, conforme ilustrado na Figura 14, para cada grupo foi produzida as gerações F1 e F2 em três CelBio-RnD (triplicata) cada, para garantir resultados consistentes da pesquisa. Para F1, foram acasaladas 8 machos e 8 fêmeas selvagens (parentais), que deram origem à geração F1. Os indivíduos emergentes de F1 foram submetidos a análise e repique (transferidos para novas CelBio-RnD), para a geração F2. Foi estabelecido um tempo de dois

dias para o repique entre as CelBio-RnD, garantindo a oviposição (o tempo para depositar os ovos) para produção das gerações.

Figura 14 - Desenho experimental com as *Drosophila melanogaster*.



Fonte: O autor (2024).

O experimento foi realizado com grupos expostos ao radônio e controle, cada um em triplicata. O número 1 representa os parentais utilizados para a obtenção da geração F1. As moscas emergentes da F1, indicadas pelos números 2 e 3, foram submetidas a uma análise 4 e 5. A partir da F1, foi gerada a F2 (5), cujos descendentes também foram submetidos à análise (6). Todo o experimento foi conduzido dentro da CelBio-RnD.

Para avaliar os efeitos biológicos da exposição ao radônio, foram analisadas apenas as gerações F1 e F2, avaliação até a F2 oferece uma combinação ideal de estabilidade genética, controle de variáveis e eficiência operacional, avaliando os efeitos de tratamentos ou seleções com confiabilidade, reduzindo o impacto de fatores externos sobre os resultados, enquanto a inclusão de gerações subsequentes, como a F3, é ideal para avaliação de estudos a longo prazo para avaliar evolução e mudanças genéticas nas futuras gerações (Gomes, 2001). O experimento foi conduzido em três repetições independentes para assegurar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

#### 4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A partir da análise dos resultados obtidos no experimento com o conjunto de dados referentes à quantidade amostral de moscas expostas ao radônio e no grupo controle nos três números experimentais realizados, foram submetidos ao tratamento estatístico, utilizando de parâmetros de análise estatística descritiva, envolvendo o cálculo da média, mediana e coeficiente de variação, além de parâmetros de testes de correlação e o T de Student, utilizando o software Minitab Statistical Software 22.

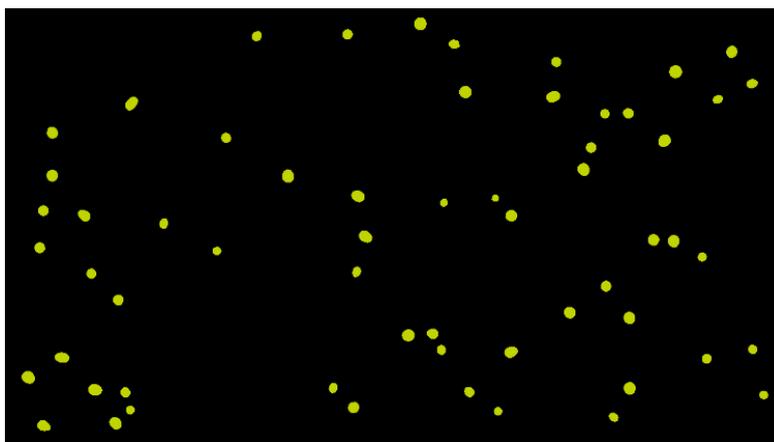
## 5 RESULTADOS

### 5.1 MONITORAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO RADÔNIO NA CELBIO-RND DENTRO DA CAMIND A-RN.

#### 5.1.1 Análise dos detectores passivos antes do experimento com as *Drosophila melanogaster*

Os CR-39 distribuídos dentro das CelBio-RnD dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn foram submetidos ao processo de revelação e análise. A Figura 15 apresenta uma imagem do CR-39 exposto por 60 dias, processada no Quantikov, que quantificou a quantidade de traços presentes no detector, todos seguindo os mesmos parâmetros para o processamento.

Figura 15 - Imagem do CR-39 processada pelo Quantikov.



Fonte: O autor (2024).

Os traços amarelos apresentados na imagem, são resultados da interação da radiação alfa com o detector.

A concentração média de radônio (Rn) no ambiente interno, medida a partir de nove detectores CR-39 instalados no interior da CelBio-RnD antes do experimento com as *Drosophila*, foi de  $972,76 \pm 344$  Bq·m<sup>3</sup>, com um coeficiente de variação de 35%. A Tabela 1 apresenta os resultados específicos de cada detector CR-39 para diferentes tempos de exposição. Observa-se que as menores concentrações foram registradas no período de 20 dias de exposição. Esse resultado é atribuído à natureza passiva dos detectores, que requerem um tempo maior para atingir leituras estáveis e representativas. Em contraste, os períodos de exposição de 40 e 60 dias apresentaram concentrações mais consistentes, com menor flutuação

nos valores registrados.

Tabela 1 - Avaliação do Rn indoor utilizando o CR-39

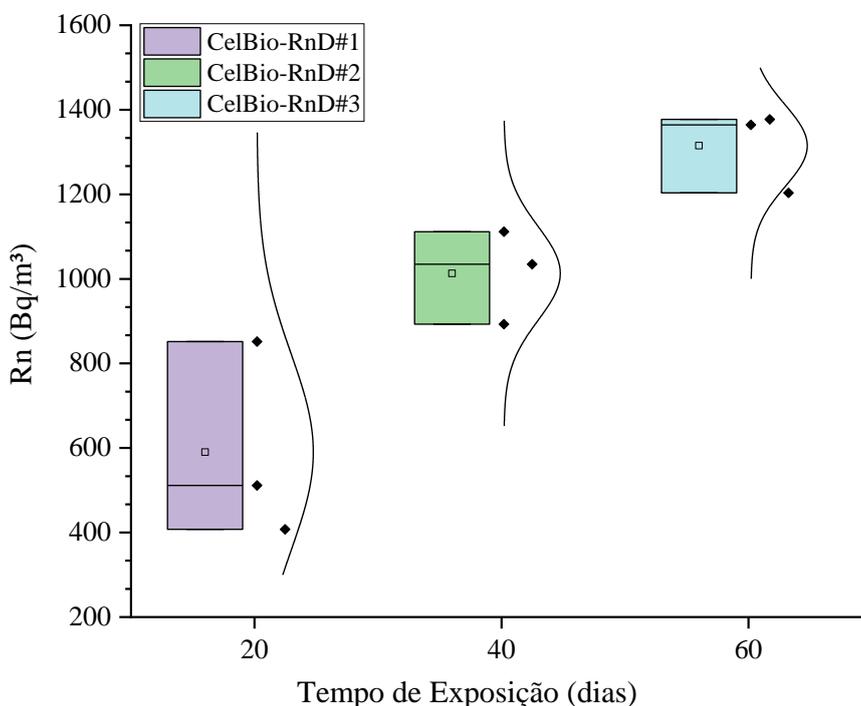
<b>Altura (cm)</b>	<b>CR -39</b>	<b>Exposição (dia)</b>	<b>Rn (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
<b>11</b>	1	20	511 ± 90
<b>7,7</b>	2	20	407 ± 100
<b>4,0</b>	3	20	852 ± 101
<b>11</b>	4	40	1112 ± 1
<b>7,7</b>	5	40	1034 ± 72
<b>4,0</b>	6	40	893 ± 7
<b>11</b>	7	60	1364 ± 125
<b>7,7</b>	8	60	1377 ± 84
<b>4,0</b>	9	60	1203 ± 13

Fonte: O autor (2024).

A Figura 16 apresenta um gráfico box plot, das concentrações de Rn dentro da CelBio-RnD no interior da CamInd  $\alpha$ -Rn no período de 20, 40 e 60 dias.

Para o período de 20 dias, os detectores 1, 2 e 3, apresentaram uma concentração média de radônio de  $590 \pm 232$  Bq.m<sup>3</sup>, com um coeficiente de variação de 39%. No período de 40 dias, medido pelos CR-39 de números 4, 5 e 6, a concentração média foi de  $1.013 \pm 111$  Bq.m<sup>3</sup>, com valores mínimo e máximo de 893 Bq.m<sup>3</sup> e 1.112 Bq.m<sup>3</sup>, respectivamente, e um coeficiente de variação de 11%. Para o período de 60 dias, usando os dispositivos 7, 8, e 9, obteve-se uma média de  $1.364 \pm 97$  Bq.m<sup>3</sup>, com valores mínimo e máximo de 1.203 Bq.m<sup>3</sup> e 1.377 Bq.m<sup>3</sup>, respectivamente, e um coeficiente de variação de 7%.

Figura 16 - Concentração do Rn pelo tempo de exposição

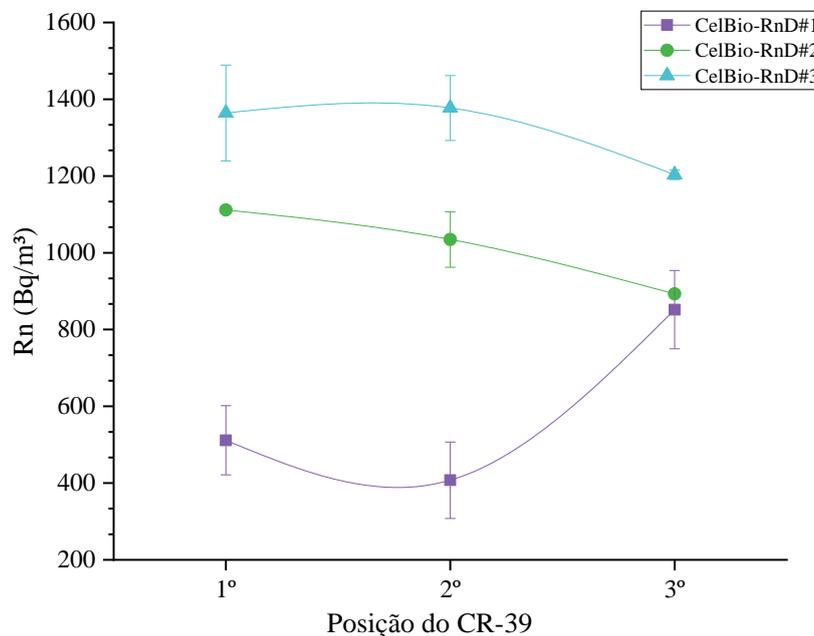


Fonte: O autor (2024).

As variações observadas nas médias de concentração de radônio para cada período monitorado podem ser atribuídas às características de Material Radioativo de Ocorrência Natural (NORM) da amostra, à geometria da CelBio-RnD e às flutuações na pressão atmosférica durante os experimentos.

Ao comparar as concentrações detectadas em função da posição dos detectores CR-39 no suporte, a Figura 17 ilustra o gráfico da distribuição dos CR-39 nas três posições distintas dentro da CelBio-RnD 1º superior, 2º intermediária e 3º inferior, nos diferentes tempos de exposição: 20 dias (representado em roxo), 40 dias (em verde) e 60 dias (em azul). Os resultados indicam que a concentração de radônio varia conforme a posição do detector, sendo geralmente maior nas partes superior (posição 1) e inferior (posição 3) do suporte, enquanto a posição intermediária (posição 2) apresenta os menores valores. Além disso, o tempo de exposição impacta diretamente a consistência das medições: detectores expostos por 20 dias apresentam maior variabilidade, enquanto aqueles expostos por 40 e 60 dias mostram maior estabilidade, com os valores mais elevados e confiáveis registrados no período de 60 dias.

Figura 17 - Distribuição dos CR-39 nas três posições no suporte dentro da CelBio-RnD



Fonte: O autor (2024).

CR-39 nas três posições distintas dentro da CelBio-RnD 1º superior, 2º intermediária e 3º inferior, nos diferentes tempos de exposição: 20 dias (representado em roxo), 40 dias (em verde) e 60 dias (em azul).

Essa relação reflete o comportamento típico de detectores passivos, que necessitam de maior tempo para acumular traços representativos do gás. A heterogeneidade na distribuição espacial do radônio sugere fatores ambientais ou dinâmicos que influenciam a concentração nas diferentes posições do suporte.

### 5.1.2 Análise do comportamento da concentração do radônio durante o experimento com as *Drosophila melanogaster* nos detectores passivos

A concentração média de radônio (Rn) no ambiente interno foi monitorada durante o período de exposição das *Drosophila melanogaster* ao gás, utilizando quatro detectores CR-39 instalados no interior das CelBio-RnD. A média obtida foi de  $1.144 \pm 130$  Bq·m<sup>3</sup>, com um coeficiente de variação de 12%. A Tabela 2 apresenta os resultados individuais de cada detector CR-39 para os diferentes tempos de exposição, os quais corresponderam aos períodos necessários para o desenvolvimento das gerações F1 e F2, de 33 e 31 dias, respectivamente.

Esses intervalos foram mantidos consistentes ao longo dos outros dois experimentos conduzidos com a mesma metodologia.

Tabela 2 - Avaliação do Rn indoor utilizando o CR-39 durante exposição das *Drosophila melanogaster*

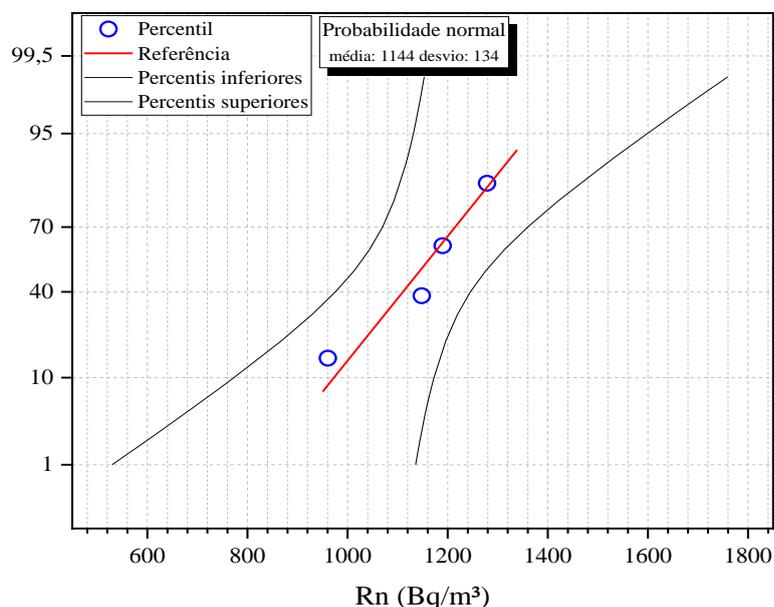
Altura (cm)	CR -39	Exposição (dia)	Rn (Bq/m <sup>3</sup> )
11	1	33	1190 ± 9
4,0	2	33	1148 ± 154
11	3	31	1279 ± 17
4,0	4	31	961 ± 87

Fonte: O autor (2024).

A Figura 18 apresenta um gráfico que descreve a distribuição das concentrações de radônio (Rn) dentro da CelBio-RnD posicionada no interior da CamInd  $\alpha$ -Rn, ao longo de 31 e 33 dias de experimento. Todos os quatro detectores CR-39 foram removidos simultaneamente no final desse período, correspondente ao término do desenvolvimento das gerações F1 e F2. Em seguida, os detectores passaram pelo processo de revelação e análise.

A partir dos dados coletados dos quatro CR-39 alocados nas duas CelBio-RnD, foi calculada uma média aritmética geral das concentrações de radônio, obtendo-se um valor de  $1.144 \pm 134$  Bq/m<sup>3</sup>, com concentrações mínima e máxima de 961 Bq/m<sup>3</sup> e 1.279 Bq/m<sup>3</sup>, respectivamente, e um coeficiente de variação de 12%.

Figura 18 - Distribuição normal para os dados de monitoração das *Drosophila melanogaster*



Fonte: O autor (2024).

Todos resultados encontrados da concentração de radônio com os CR-39 no interior da CamInd  $\alpha$ -Rn, dentro da Celbio-Rnd, foram obtidos por meio de medições realizadas antes do experimento (aos 20, 40 e 60 dias) e durante o experimento com as *Drosophila melanogaster* (aos 31 e 33 dias). Esses tempos correspondem à duração do experimento necessária para a produção das gerações F1 e F2, sendo o protocolo repetido em outros dois experimentos realizados com o mesmo desenho experimental.

Para avaliar possíveis variações significativas na concentração de radônio em função da manipulação na câmara e dos diferentes tempos de exposição, realizou-se uma análise comparativa. Os dados apresentados mostram que o valor mais discrepante foi registrado aos 20 dias Figura 16, com uma média de  $590 \pm 232 \text{ Bq.m}^3$ , enquanto as concentrações medidas nos tempos de 31, 33, 40 e 60 dias apresentaram maior consistência, com médias próximas entre si.

Esses resultados enfatizam a importância do tempo de exposição como um fator determinante na análise da concentração de radônio no ambiente. Assim, foi calculada uma média ponderada, com pesos proporcionais ao tempo de exposição, para obter uma estimativa mais representativa dos dados. Antes do experimento, sem as *Drosophila* a média ponderada foi de  $1.093 \pm 124 \text{ Bq.m}^3$ , com um coeficiente de variação (CV) de 11%. Durante o experimento, a média ponderada foi de  $1.145 \pm 124 \text{ Bq.m}^3$ , com um CV de 10,84%. Esses resultados indicam que não houve influência significativa na concentração de radônio antes e durante no experimento com as *Drosophila melanogaster* dentro da Celbio-Rnd. No interior da CamInd  $\alpha$ -Rn.

Para consolidar os dados, foi calculada uma média aritmética final das concentrações experimentais, que resultou em um valor único de  $1.119 \pm 37 \text{ Bq.m}^3$ , com um CV de 3,29%, definido a concentração real que as *Drosophila melanogaster* do tipo selvagem foram expostas ao gás radônio. Devido à presença de níveis elevados de urânio no ambiente, com condições controladas, a concentração final de radônio detectada ultrapassa os limites estabelecidos pela ICRP 126 (2014), os quais recomendam valores de referência entre 100 e 300  $\text{Bq/m}^3$  para exposição dos seres humanos.

No estudo realizado por Guimarães (2022), utilizando o simulador CamInd  $\alpha$ -Rn, foi registrada uma concentração média de radônio de  $3.200 \pm 324 \text{ Bq/m}^3$ . O trabalho apresentou variações nas concentrações detectadas por detectores passivos posicionados em diferentes locais dentro da câmara, evidenciando a influência da posição no resultado obtido. Além disso,

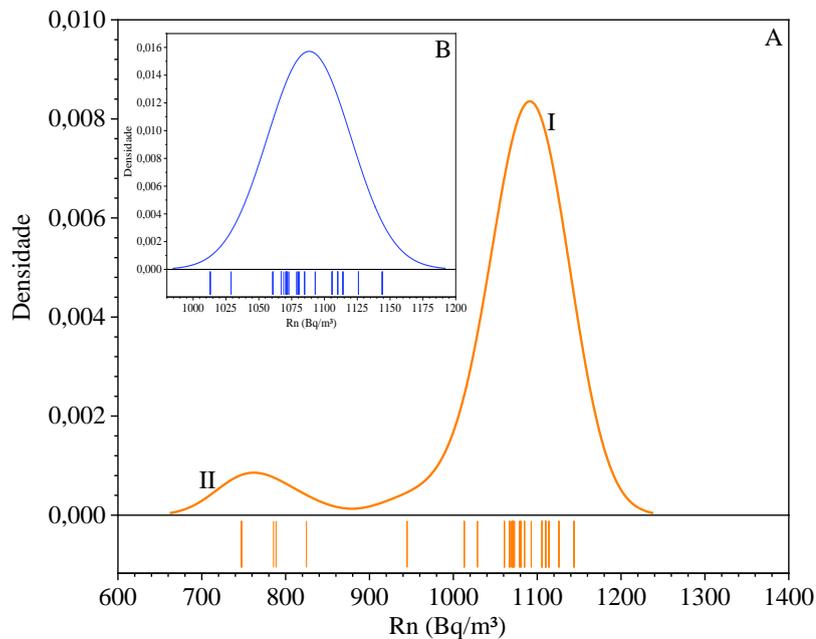
a autora destacou o impacto do tempo de exposição dos detectores, o que resultou em concentrações variadas, reforçando a importância desses fatores na análise da distribuição de radônio no ambiente simulado.

## 5.2 CERTIFICAÇÃO DO VALOR ENCONTRADO NO CR-39 COM A CÂMARA DE DIFUSÃO PASSIVA

O gráfico apresentado na Figura 19, derivado de um monitoramento de 23 dias utilizando o detector Corentium Home, ilustra a distribuição das concentrações de radônio (Rn) por meio de uma função de densidade de probabilidade. Identificam-se duas regiões principais A e B. Na região A, as concentrações variam de 747 Bq/m<sup>3</sup> a 1.093 Bq/m<sup>3</sup>. Durante os dois primeiros dias de monitoramento, representados no ponto II, observam-se concentrações menores, com uma média  $1.056 \pm 98$  Bq.m<sup>3</sup>, com concentrações mínima e máxima de 747 Bq/m<sup>3</sup> e 1.144 Bq/m<sup>3</sup>, e um coeficiente de variação de 9%.

Sendo um detector passivo, o valor real da concentração de radônio é estimado de forma mais precisa a longo prazo. Após o período inicial de monitoração de 2 dias, os 21 dias restantes (destacados no número I, região A) apresentaram uma concentração média de  $1.088 \pm 32$  Bq.m<sup>3</sup>, com concentrações mínima e máxima de 1.012 Bq/m<sup>3</sup> e 1.144 Bq/m<sup>3</sup>, e um coeficiente de variação de 3%. Esse intervalo corresponde ao nível real de concentração de radônio no ambiente monitorado. Na Figura 19, a região B destaca a uniformidade da distribuição das concentrações encontradas na região A, representada pelo ponto I, assegurando a consistência das medições realizadas.

Figura 19 - Medidas de radônio com Airthrings, gráfico de função de densidade de probabilidade.



Fonte: O autor (2024).

Os resultados obtidos confirmam a precisão das medições realizadas na CelBio-RnD, especialmente ao serem comparadas com os valores obtidos pelo detector CR-39. A concentração final encontrada com o CR-39 foi de  $1.119 \pm 37 \text{ Bq.m}^3$ , com um CV de 3,29%. Por sua vez, o Corentium Home registrou uma concentração média de  $1.088 \text{ Bq.m}^3 \pm 32 \text{ Bq.m}^3$ , e um coeficiente de variação de 3%. A semelhança entre esses valores demonstra a confiabilidade e a consistência dos dados obtidos nos experimentos.

Além disso, os resultados evidenciam variações significativas na distribuição das concentrações de radônio ao longo do período de monitoramento, destacando a robustez metodológica empregada.

### 5.3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTOCOLO PARA CRIAÇÃO DAS *DROSOPHILA MELANOGASTER* NO DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

Após o recebimento das *Drosophila melanogaster* no laboratório, foi realizado o devido manejo para acomodá-las em um ambiente adequado ao cultivo. Paralelamente, procedeu-se ao

planejamento e à preparação do meio de cultura, assegurando condições ideais para a manutenção e produção de novas gerações. Foram também organizados e higienizados todos os materiais necessários, como vidrarias, recipientes, funis e pincéis, garantindo sua utilização segura e eficiente nos trabalhos com esses organismos.

#### 5.4 EFICIÊNCIA DA CELBIO-RND UTILIZADA NO EXPERIMENTO

Para a condução dos experimentos no departamento, utilizou-se da Celbio-Rnd, desenvolvido para a criação das *Drosophila melanogaster*, que contribuiu para uma maior eficiência na pesquisa, otimizando os procedimentos experimentais e os resultados obtidos das características fenotípicas, além de utilizá-la para exposição dos detectores de radônio dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn.

#### 5.5 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FENÓTIPICAS

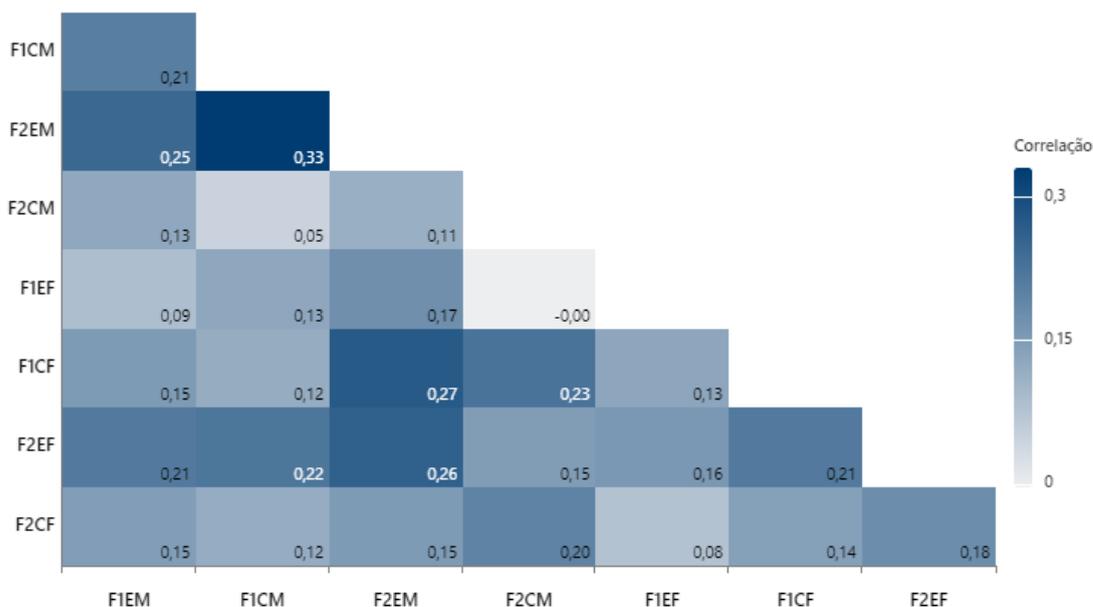
A análise das características fenotípicas das *Drosophila melanogaster* incluiu a avaliação de alteração na cor dos olhos, quantidade de listras, tamanho do corpo e alteração no formato das asas. Foram analisadas 6.768 moscas durante os três números experimentais realizados com os grupos de exposição ao gás radônio e o grupo controle, que resultou em mais de 4.060 imagens capturadas, representando 60% das *Drosophila melanogaster* obtidas durante os experimentos e cerca de 8.121 medições corporais realizadas para obtenção dos resultados .

##### 5.5.1 Análise do tamanho do corpo

Os valores obtidos a partir das medições corporais das *Drosophila melanogaster* estão representados no Figura 20. Este gráfico foi gerado com base na metodologia rigorosamente aplicada durante os experimentos, permitindo a análise das variações no tamanho corporal de machos e fêmeas expostos ao gás radônio em comparação aos grupos controle, nas gerações F1 e F2. A distribuição de dados foi separada em quatro categorias principais: Fêmeas expostas ao radônio e fêmeas do grupo controle; Machos expostos ao radônio e machos do grupo controle. Cada barra representa a média do tamanho corporal medido, com intervalos de erro padrão indicados para cada grupo. Os resultados não demonstraram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos expostos ao radônio e os controles, tanto para fêmeas quanto para

machos, em ambas as gerações F1 e F2.

Figura 20 - Correlação do tamanho corporal das *Drosophila melanogaster*.



Fonte: O autor (2024).

Comparação do tamanho corporal médio de machos e fêmeas de *Drosophila melanogaster* expostos ao gás radônio e grupos controle, avaliados nas gerações F1 e F2, E e C, significa, exposição e controle, e M e F, machos e fêmeas.

As barras indicam a média com erros padrão.

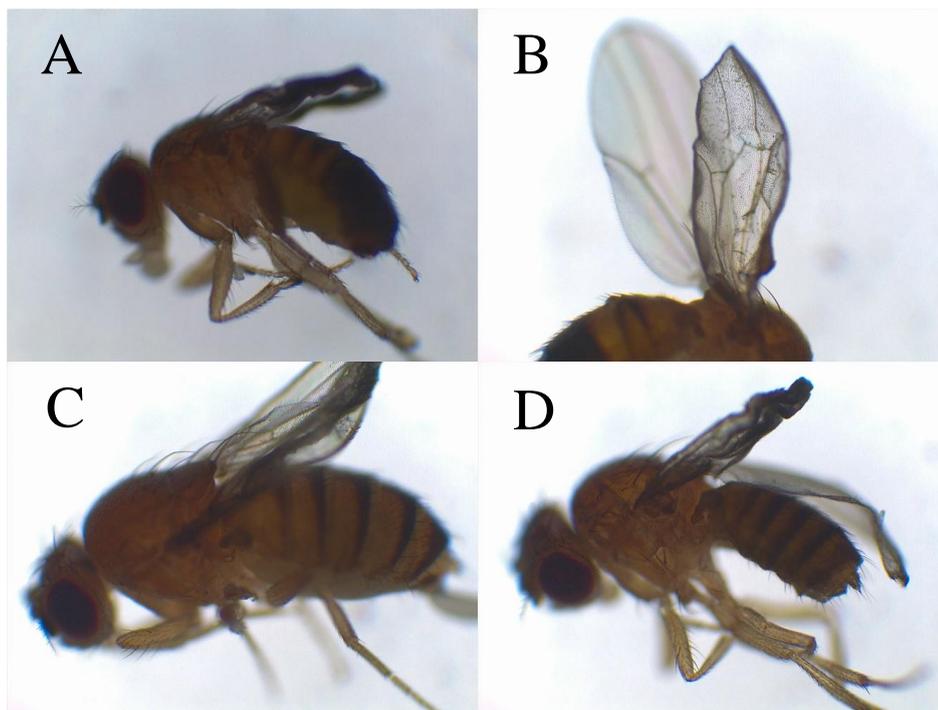
As medições detalhadas do tamanho corporal entre os machos e fêmeas permaneceram consistentes e não evidenciaram alterações significativas em comparação ao grupo controle. Além disso, nas características analisadas, como a cor dos olhos e a quantidade de listras nas *Drosophila melanogaster* não foram identificadas alterações em nenhum dos três experimentos realizados. Também foi realizado o teste T de Student que apresentou um  $p\text{-value} < 0,05$  que tem diferença significativa para um nível de significância de 5%, na geração F1M, F2M, F1F, o único que não apresentou foi F2F.

### 5.5.2 Análise na asa

Durante os experimentos, foram identificadas alterações nas asas das *Drosophila melanogaster* em todos os três ensaios realizados, na Figura 21, destaca-se as alterações

estrutural encontradas nas asas, observadas em ambos os grupos experimentais: controle (Figuras 21 A e C) e exposto ao gás radônio (Figuras 21 B e D).

Figura 21 - Alterações morfológicas nas asas de *Drosophila melanogaster* observadas durante os experimentos.



Fonte: O autor (2024).

<sup>(A)</sup> <sup>(C)</sup> Macho e fêmea de *Drosophila melanogaster* com alteração nas asas no grupo controle e <sup>(B)</sup> <sup>(D)</sup> Macho e fêmea alteradas expostas ao gás radônio.

A quantidade de alterações identificadas nas asas, em relação ao número total de *Drosophila* eclodidas nessas gerações alteradas, está descrita na Tabela 3, com os dados obtidos ao longo dos três experimentos realizados. A Tabela 3 apresenta os dados referentes às alterações fenotípicas identificadas nas gerações F1 e F2 durante os experimentos, segregadas por sexo, correspondente a geração. Observadas em indivíduos expostos ao gás radônio e controle. Contudo, a frequência dessas alterações não demonstrou significância estatística ao ser comparada ao grupo controle, que também exibiram alterações. Exposta a radiação foram encontradas 6 fêmeas e 3 machos, e no controle foram, 3 fêmeas e 3 machos.

Tabela 3 - Comparação das alterações nas asas e a frequência de eclosão das *Drosophila melanogaster* por geração alterada.

Número experimental	Geração	Alterações	Total de indivíduo eclodidos por geração das alterações	
			Machos	Fêmeas
<b>1n</b>	F1 exposição	1 macho e 3 fêmeas	259	266
	F1 controle	1 macho e 2 fêmeas	277	276
	F2 exposição	1 fêmea	-	273
	F2 controle	1 fêmeas	-	280
<b>2n</b>	F1 exposição	2 machos e 1 fêmeas	285	328
	F1 controle	2 machos	291	-
	F2 exposição	Ausente	-	-
	F2 controle	Ausente	-	-
<b>3n</b>	F1 exposição	1 fêmea	-	249
	F1 controle	Ausente	-	-
	F2 exposição	Ausente	-	-
	F2 controle	Ausente	-	-
Total por sexo nos três experimentos		6 machos 9 fêmeas	1.112	1.672

Fonte: O autor (2024).

Total de alterações fenotípicas observadas nas *Drosophila melanogaster*, expostas ao radônio e o grupo controle, comparada com número de indivíduos eclodidos. Os dados incluem as gerações F1 e F2, discriminando por sexo.

De forma geral, observou-se que as fêmeas apresentaram maior frequência de alterações fenotípicas nas asas em comparação aos machos. E o total geral de *Drosophila melanogaster* eclodidas nos três experimentos apresentado na Tabela 4, totalizando 6.768 indivíduos, sendo 3.446 fêmeas, o que representa 51% do valor total, enquanto 3.322 machos foram registrados, correspondendo a 49%.

A análise dos dados das gerações F1 e F2, tanto de machos quanto de fêmeas, indica que as alterações identificadas nas asas dos espécimes não podem ser atribuídas diretamente à influência do gás radônio, considerando que o grupo controle apresentou alterações semelhantes.

Na Tabela 4 apresenta a distribuição total das *Drosophila melanogaster* eclodidas durante os três experimentos realizados, discriminadas por sexo.

Tabela 4 - Distribuição Total de *Drosophila melanogaster* por geração e sexo.

<b>Número experimental</b>	<b>Geração</b>	<b>Machos</b>	<b>Fêmeas</b>
<b>1n</b>	F1 exposição	259	266
	F1 controle	277	276
	F2 exposição	324	273
	F2 controle	256	280
<b>2n</b>	F1 exposição	285	328
	F1 controle	291	329
	F2 exposição	312	356
	F2 controle	343	396
<b>3n</b>	F1 exposição	249	250
	F1 controle	200	274
	F2 exposição	245	201
	F2 controle	281	217
<b>Soma das <i>Drosophilas melanogaster</i> por sexo</b>		3.322	3.446
<b>Total de <i>Drosophilas melanogaster</i></b>		6.768	

Fonte: O autor (2024).

Os resultados indicam que as alterações fenotípicas nas asas observadas não podem ser atribuídas diretamente à exposição ao gás radônio, dado que as frequências de alterações no grupo controle foram comparáveis às do grupo exposto. Adicionalmente, a maior frequência de alterações fenotípicas entre as fêmeas sugere uma possível sensibilidade diferencial entre os sexos, embora tal hipótese requeira estudos adicionais para confirmação.

Pereira et al., (2024) realizaram estudos em áreas contendo materiais radioativos, caracterizadas por afloramentos rochosos ricos em urânio e tório, o trabalho investigou os efeitos da radiação natural, destacando a radioresistência de *Drosophila melanogaster* em um

ambiente com elevados níveis de radônio-222. A análise do genoma por meio do ensaio cometa, revelou que, durante o desenvolvimento, esses organismos foram capazes de se adaptar ao ambiente, reparando eventuais danos genéticos causados pela exposição à radiação.

Diferente de outros estudos que têm destacado a relevância de *Drosophila melanogaster* como organismo modelo para avaliar a genotoxicidade quando expostas ao radônio. Silva (2020) mostrou que, mesmo as doses de radiação natural, incluindo o Radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), em ambiente com baixas doses, causaram danos ao material genético das *Drosophila* em gerações sucessivas da mesma linhagem. Um ensaio cometa foi realizado em larvas expostas ao ar atmosférico ao redor de açudes nas cidades de Parelhas e Lucrecia, no Rio Grande do Norte, Brasil. Investigando o efeito genotóxico de poluentes ambientais desses açudes nas *Drosophila melanogaster*, avaliando a presença de radônio e metais. Os resultados indicaram riscos à população com o consumo da água, uma vez que foi observado efeito genotóxico em hemócitos das *D. melanogaster*.

## 5.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Não foram observadas alterações significativas no ciclo de vida das *Drosophila melanogaster* entre os grupos expostos ao radônio e o grupo controle. Em todos os três experimentos realizados, o ciclo de desenvolvimento permaneceu constante, com uma duração média de 10 dias desde a oviposição até a formação do indivíduo adulto, apresentando apenas uma variação de um dia a mais ou a menos para eclosão do indivíduo adulto.

## 6 CONCLUSÃO

A implementação do protocolo para a criação de *Drosophila melanogaster* no Departamento possibilitou um avanço nos estudos conduzidos pelo grupo, promovendo novas perspectivas e estratégias para pesquisas na área de dosimetria ambiental. Esse desenvolvimento contribuiu para o estabelecimento de um monitoramento contínuo de materiais radioativos de ocorrência natural, ampliando o entendimento sobre os efeitos do radônio no ambiente controlado.

A construção da CelBio-RnD demonstrou ser um marco importante para a pesquisa, proporcionando melhor desempenho experimental devido à sua praticidade nos repiques com *Drosophila melanogaster* e na exposição eficiente com os detectores de radiação. Sua estrutura permitiu maior precisão no controle das variáveis experimentais e na manipulação das espécie.

A determinação da concentração de radônio no ambiente experimental revelou que os níveis de radônio e seus produtos de decaimento, presentes no interior da CelBio-RnD dentro da CamInd  $\alpha$ -Rn, à qual as *Drosophila melanogaster* foram expostas, não causaram alterações significativas no ciclo de vida nem nas características fenotípicas analisadas, quando comparadas ao grupo controle. Esses resultados indicam que os indivíduos apresentaram resistência às concentrações de radônio aplicadas durante o experimento.

Para futuros estudos, recomenda-se a realização de testes adicionais, com ênfase na análise genética, visando avaliar potenciais efeitos não identificados nas análises fenotípicas realizadas. Essa abordagem permitirá explorar possíveis alterações subjacentes e ampliar o entendimento sobre os impactos do radônio em nível molecular.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, Mark D. Celniker, S. E., Holt, R. A., Evans, C. A., Gocayne, J. D., Amanatides, P. G., ... & Saunders, R. D. The genome sequence of *Drosophila melanogaster*. **Science**, v. 287, n. 5461, p. 2185-2195, 2000.
- AFONSO, Júlio Carlos. Radônio. **Química nova na escola**, v. 32, n. 4, p. 267-268, 2009.
- AIRTHINGS. Manual de operação do Corentium Home. Disponível em: [https://www.airthings.com/hubfs/01\\_Website/Manuals/Home/1-043-Corentium-Home-manual-60x77.pdf](https://www.airthings.com/hubfs/01_Website/Manuals/Home/1-043-Corentium-Home-manual-60x77.pdf) Acesso em: 04 de novembro de 2024.
- ALMEIDA AGUIAR, Cristina. **Hereditariedade e evolução: guia de trabalhos práticos**. 2015.
- AMABIS, José Mariano; MARTHO, Gilberto Rodrigues. **Biologia 3. 2.** ed. São Paulo: Moderna, 2010.
- ASHBURNER, M. **The Development of *Drosophila melanogaster***. In: PRESS, C. SHL. (Ed.). New York, 1993. p.1493-1506.
- AZEVEDO, Ana Cecília Pedrosa de. **Radioproteção em serviços de saúde. FIOCRUZ- Rio de Janeiro**, 2005.
- BERNARDES, Lucas Matos Martins et al. **Validação de diferentes meios de cultura para estudos da progressão da doença de Alzheimer em *Drosophila melanogaster***. 2018.
- BECKINGHAM, K.M.; ARMSTRONG, J.D.; TEXADA, M.J.; MUNJAAL, R.; BAKER, D.A. *Drosophila melanogaster*-the model organism of choice for the complex biology of multi-cellular organisms. **American Society for Gravitational and Space Biology**, v.18, n.2, p.7-29, jun. 2005.
- BEZUIDENHOUT, Jacques. Estimation of radon CelBio-RnDntial through measurement of uranium concentrations in granite geology. **South African Journal of Science**, v. 115, n. 7-8, p. 1-4, 2019.
- BRITO, Elias Avancini; FAVARETTO, José Arnaldo. **Biologia: uma abordagem evolutiva e ecológica**. Moderna, 1997.
- BOLUS, N. E.; **NCRP Report 160 and What It Means for Medical Imaging and Nuclear Medicine**. Journal of Nuclear Medicine Technology 2013, 41, 255.
- BONOTTO, D. M. **Groundwater toxicity due to natural dissolved radionuclides belonging to the U and Th decay series**. In: Mathis H. Lefebvre; Matheo M. Roux. (Org.). Progress on drinking water research. 1 ed. New York: Nova Science Publishers, 2008. v.1, p.199-240.
- BONOTTO, D. M. **Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani**, Editora UNESP: São Paulo, 2004. CALLISTO, Marcos; GONÇALVES JR, José Francisco; MORENO, Pablo.

Invertebrados aquáticos como bioindicadores. **Navegando o Rio das velhas das Minas aos Gerais**, v. 1, p. 1-12, 2005.

CAZULA, D. C. **Dosimetria de Rn-222 no ar em ambientes localizados acima e abaixo do nível do solo**. 2015. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear: Aplicações). Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

CORRÊA, J. N. **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2011, 112p. Einsebud, M. Gessel, T. (1997).

EPA (United States Environmental Protection Agency). **Consumer's Guide To Radon Reduction: The Guide to Protecting Yourself and Your Family From Radon**. Jan., 2016. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/2016\\_consumers\\_guide\\_to\\_radon\\_reduction.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/2016_consumers_guide_to_radon_reduction.pdf). Acesso em 28 de junho de 2023.

EPA, Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, EPA'S Strategy to Reduce Ris of Radon, **Special Report of Journal of Enviromental Health**, 1993.

GAIVÃO, I.; SIERRA, M. Drosophila comet assay: insights, uses, and future perspectives. **Frontiers in Genetics**, v. 5, n. 304, ago. 2014.

GOMES, Rui Artur PL. PROTOCOLO-Utilização de Drosophila em Genética: 1ª Parte. **Dep. Biologia Vegetal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa**, 2001.

GUIMARÃES, Cassya Regina Pereira. **Construção e caracterização de simulador Rn para uso in vivo (CAMIND alpha-Rn)**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

IAEA (International Atomic Energy Agency), 2015 The International Nuclear and Radiological Event Scale , Disponível em: Acesso em : 12 mai. 2015.

ICRP Publication 65, Protection Against Radon-222 at Home and at Work. Disponível em: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%2065>. Acesso em: 10 de junho de 2023.

ICRP: International Commission on Radiological Protection. ICRP 65 – Protection Against Radon-222 at Home and at Work. **Oxford**: Pergamon Press, v. 23, n. 2, 1993.

JOHNSTON, D. S. The art and desing of genetic screens: Drosophila melanogaster. **Nature**, v. 3, n. 3, p. 176-188, mar. 2002.

KAPUSTA, Simone Caterina. **Bioindicação ambiental**. 2016.

KELLER, E. F. Drosophila embryos as transitional objects: the work of Donald Poulson and Christiane Nusslein-Volhard. *Hist Stud Phys Biol Sci*, v. 26, n. 2, p. 313-46, 1996ISSN 0890-9997 (Print).

LEICA, M. Manual de operação do microscópio óptico DM-500, 2019. Disponível em: [https://downloads.leicamicrosystems.com/DM500/User%20Manual/Leica\\_DM500\\_UserManual\\_PT.pdf](https://downloads.leicamicrosystems.com/DM500/User%20Manual/Leica_DM500_UserManual_PT.pdf) Acesso em: 26 de julho de 2023.

LUMEN. Manual de operação do microscópio estéreooscópico binocular de led com aumento de 80X LM350B. Disponível em: <https://www.lumenmicroscopio.com.br/produtos/estereomicroscopio-binocular-lm350b-lumen> Acesso em: 15 de agosto de 2024.

MORGAN, Thomas Hunt. **Sex limited inheritance in Drosophila**. Science, v. 32, n. 812, p. 120-122, 1910.

MICHALSKA, Katarzyna; MROWIŃSKA, Agnieszka; STUDNICKI, Marcin. **Ectoparasitism of the Flightless Drosophila melanogaster and D. hydei by the Mite Blattisocius mali** (Acari: Blattisociidae). Insects, v. 14, n. 2, p. 146, 2023.

MÜLLER, H.J. Artificial transmutation of the gene. **Science**, v. 66, p. 84–87, jul. 1927.

NADALETI W. C.; BELLI FILHO, P.; NEGE, K, K.; ANDREAZZA, ROBSON; QUADRO, M.; CORREA E. K.; CORREA, L.; LEANDRO, D.; VIEIRA, B.; CASTRO, A. Cinética e Equilíbrio Secular das Principais Séries Radioativas e suas Implicações Ambientais. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade. ISSN 2448-1661. Pelotas, RS, UFPel-Ceng v.2, n.2, p.1-9, dez. 2016.

NELSON A. W.; EITRHEIM, E. S.; KNIGHT, A. W.; MAY, D.; MEHRHOFF, M. A.; SHANNON, R.; LITMAN, R.; BURNETT, W. C.; FORBES, T. Z.; SCHULTZ, M. K. Understanding the Radioactive Ingrowth and Decay of Naturally Occurring Radioactive Materials in the Environment: An Analysis of Produced Fluids from the Marcellus Shale. Environ Health Perspect. 2015 Jul; 123(7): 689 696. Published online 2015 Apr 2. doi: 10.1289/ehp.1408855.

NEPOMUCENO, J. C. Using the Drosophila melanogaster to assessment carcinogenic agents through the Test for Detection of Epithelial Tumor Clones (Warts). **Advanced Techniques in Biology & Medicine**, v.3, n.3, p. 1-8, out.,2015.

OHE, T.; WATANABE, T.; WAKABAYASHI, K. Mutagens in surface waters: A review. **Mutation Research**, v. 567, n. 2-3, p.109–149, nov. 2004.

OLIVEIRA, E. P. **Comparação de técnicas ativa e passiva na medição de concentração de radônio (<sup>222</sup>Rn) no ar**. 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Radioproteção e Dosimetria), Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CNEN, Rio de Janeiro, 2017.

OLIVEIRA, L. H. L.; REBOLO, M. D.; JACINTO, M. V. G.; CAVALCANTI NETO M. T. O. Radioatividade das Areias Utilizadas na Construção Civil da Cidade do Natal/RN. Revista HOLOS, 2012, Ano 28, Vol. 5.

OLIVEIRA, Lorryayne Guimarães et al. Como a genética contribuiu para compreender os efeitos biológicos da exposição humana à radiação ionizante de Césio-137? **Genética na Escola**, v. 17, n. 2, p. 160-166, 2022.

PINTO, LCM—Quantikov; QUANTIKOV, C. M. **Um analisador microestrutural para o ambiente Windows**. 1996. Tese de Doutorado. Tese de D. Sc., Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, SP, Brasil.

PRESTES, Rosi Maria; VINCENCI, Kelin Luiza. **Bioindicadores como avaliação de impacto ambiental/Bioindicators as environmental impact assessment**. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 2, n. 4, p. 1473-1493, 2019.

QUEIROZ et al. **Estudo sobre teores de tório, urânio e potássio nas águas superficiais e sedimento marginal do Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil**. Revista Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 22, n. 2, p. 371-380, mar/abr, 2017.

RAND, M.D. Drosophotoxicology: The growing CelBio-RnDntial for Drosophila in neurotoxicology. **Neurotoxicology and Teratology**, v.32, n.1, p.74–83, jan-fev. 2010.

REISZ, J. A.; BANSAL, N.; QIAN, J.; ZHAO, W.; FURDUI, C. M.- **Effects of ionizing radiation on biological molecules--mechanisms of damage and emerging methods of detection**. Antioxid Redox Signal.;21(2):260-292. doi:10.1089/ars.2013.5489, 2014.

REZENDE, Gabriel Alves. **Câncer e radiação eletromagnética**, 29-40, 2022.

RODRIGUES, Camila et al. Avaliação dos Níveis de Radônio em Ambientes Fechados no Brasil: uma visão geral. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 6, p. 1372-1383, 2021.

ROOTE, John; PROKOP, Andreas. How to design a genetic mating scheme: a basic training package for Drosophila genetics. **G3: Genes| Genomes| Genetics**, v. 3, n. 2, p. 353-358, 2013.

SALCEDA, V. M. Genetic effects of radon 222 in a population of Drosophila melanogaster chronically exposed; Efectos geneticos del radon 222 en una poblacion de Drosophila melanogaster cronicamente expuesta. 1997.

SANTOS, Fernanda Pessoa de Carvalho. **Radionuclídeos naturais em águas minerais comercializadas na Cidade do Recife PE**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SANTOS, Luiz Gabriel Alves et al. **Ação da Quinacrina, inibidor de PLA2, sobre a proteína beta-amiloide em modelo de Doença de Alzheimer em Drosophila melanogaster**. 2020.

SANTOS, Josineide Marques do Nascimento. **Alfa Espec-222 como variante da SSNTD na avaliação do risco RnD em áreas impactadas com NORM**, p. 43-53 2022.

SELINUS, O. **Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health**. Amsterdam; Boston: Elsevier Academic Press, 2005. 812p.

SIDDIQUE, H.R. et al. Genotoxicity of industrial solid waste leachates in Drosophila melanogaster. **Environmental and Molecular Mutagenesis**, v.46, v.3, p.189-197, out. 2005.

SILVA, Charles do Nascimento. **CelBio-RnDncial efeito tóxico-genético em *Drosophila melanogaster* submetida à contaminação ambiental por metais pesados e radônio no Semiárido brasileiro**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. SILVA, Diego de Almeida; GODOI, Jonatã Rodrigues de; SANTOS, Zenia da Silva. Transporte de materiais radioativos e nucleares. 2021.

SILVEIRA, Luciano. **Recriação da "sala das moscas" de Morgan com alunos do ensino médio**. 2014.

SMEDLEY, P. L.; KINNIBURGH, D. G. **Uranium in natural waters and the environment: Distribution, speciation and impact**. Applied Geochemistry, p. 105534, 2022.

SNUSTAD, D. Peter; SIMMONS, Michael J. Fundamentos de Genética (4ª Edição). Guanabara. 922p, 2008.

TAVERA, L. et al. Study of the effects of radon in three biological systems; Estudio de los efectos del radon en tres sistemas biológicos. 2002.

TELES, Natália Melquie Monteiro et al. **Desenvolvimento de um modelo de doenças inflamatórias sistêmicas em *Drosophila melanogaster***. 2014.

VILLEGAS, S.N. One hundred years of *Drosophila* cancer research: no longer in solitude. **Disease Models & Mechanisms**, v. 12, n. 4, 12, dmm039032. 2019. doi:10.1242/dmm.039032.

WILDEMANN, Bruna et al. Análise do desenvolvimento e estudo do polimorfismo de inversão cromossômica de *Drosophila polymorpha* (Diptera, Drosophilidae) e sua relação com genes de choque térmico (HSPs) induzidos por estresse físico/químico. 2014.

WHO, World Health Organization (2009). Handbook on Indoor Radon, a Public Health Perspective. Geneva: Hajo Zeeb and Ferid Shannoun, p. 94.

WHO, World Health Organization (2007). International Radon Project Survey on Radon Guidelines, **Programmes and Activities**. WHO, Geneva.

ZYKOVA, T. Y., LEVITSKY, V. G., BELYAEVA, E. S., & ZHIMULEV, I. F. (2018). **Polytene chromosomes—a portrait of functional organization of the *Drosophila* genome**. Current genomics, 19(3), 179-19.