



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE BIOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOFÍSICA E RADIOBIOLOGIA
BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

FERNANDA RAMOS DA SILVA

**RESPOSTA DE EMERGÊNCIA EM DESASTRES NUCLEARES: UM ESTUDO
SOBRE AS TÉCNICAS DE TRIAGEM E DIAGNÓSTICO PARA A GESTÃO DE
VÍTIMAS**

Recife
2025

FERNANDA RAMOS DA SILVA

**RESPOSTA DE EMERGÊNCIA EM DESASTRES NUCLEARES: UM ESTUDO
SOBRE AS TÉCNICAS DE TRIAGEM E DIAGNÓSTICO PARA A GESTÃO DE
VÍTIMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado em Ciências
Biológicas da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Ciências
Biológicas.

Orientadora: Prof.a Dra. Suelen Cristina de Lima

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Fernanda Ramos da.

Resposta de emergência em desastres nucleares: um estudo sobre as técnicas de triagem e diagnóstico para a gestão de vítimas / Fernanda Ramos da Silva. - Recife, 2025.

88 p. : il., tab.

Orientador(a): Suelen Cristina de Lima

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Biociências, Ciências Biológicas - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. Acidente nuclear. 2. Síndrome aguda da radiação. 3. Sintomas. 4. Dosimetria. 5. Citogenética. I. Lima, Suelen Cristina de . (Orientação). II. Título.

610 CDD (22.ed.)

FERNANDA RAMOS DA SILVA

**RESPOSTA DE EMERGÊNCIA EM DESASTRES NUCLEARES: UM ESTUDO
SOBRE AS TÉCNICAS DE TRIAGEM E DIAGNÓSTICO PARA A GESTÃO DE
VÍTIMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado em Ciências
Biológicas da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Ciências
Biológicas.

Aprovada em: 25/11/2025

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Suelen Cristina de Lima (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Isvânia Maria Serafim da Silva Lopes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Thiago de Salazar e Fernandes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Em memória às vítimas do uso irracional da radiação, que pagaram com suas vidas o preço da negligência humana. Que sua lembrança seja sempre um chamado à verdade, à ética e à ciência a serviço da vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por ser minha fortaleza em todos os momentos de dúvida e incerteza. Foi n'Ele que encontrei forças quando pensei em desistir e esperança quando o caminho parecia difícil.

Meu agradecimento mais profundo vai para as duas pessoas mais importantes da minha vida: meus pais e melhores amigos, **Iomar e Péricles**. Tudo o que sou e conquistei é reflexo do amor, da dedicação e do esforço incansável de vocês, que sempre fizeram o possível e o impossível para me proporcionar o melhor. Obrigada por acreditarem em mim mesmo quando eu não acreditei, por me apoiarem em cada passo e por serem meu alicerce em todos os momentos. Vocês dois são os melhores pais que alguém poderia ter, amo vocês mais do que tudo!

Agradeço também à minha tia **Iamar** e ao meu primo **Iago**, que considero como um irmão. Mesmo com a distância, cada reencontro é como se o tempo nunca tivesse passado. Obrigada pelas conversas intermináveis, pelos jogos e pelas risadas até as madrugadas. Muitas das minhas lembranças mais felizes têm vocês como protagonistas.

Aos meus tios **Júnior e Francisco**, obrigada por me presentear com momentos de pura alegria e gargalhadas sinceras sempre que estávamos juntos. Aos meus avós **Otávio, Áurea e “vovó Gelita”**, deixo minha eterna gratidão por todo o amor, cuidado e pelos valores que me ensinaram: vocês moldaram quem eu sou hoje.

Aos amigos que a graduação me deu, obrigada por tornarem essa jornada mais leve e divertida. Cada conversa, risada e desabafo tornaram os dias difíceis mais suportáveis. Um agradecimento especial às minhas companheiras de aventuras acadêmicas **Melissa e Thamyres**, pelas risadas, fofocas e momentos que levarei comigo com muito carinho.

Aos colegas do meu estágio no **UNILABE do Hemope**, obrigada por cada aprendizado, pelas trocas e pela amizade que nasceu nesse período tão importante. Vocês me ensinaram sobre o verdadeiro valor da vida humana, sobre empatia e respeito. Levarei comigo cada risada, conselho e lembrança com muito afeto. Agradeço também à **UFPE** pela oportunidade de vivenciar essa experiência tão enriquecedora.

Por fim, meu agradecimento especial à minha orientadora, **Dra. Suelen Cristina**, por sua paciência, dedicação e sabedoria ao longo dessa caminhada. Obrigada por acreditar em mim, por me orientar com maestria e por compartilhar comigo seus conhecimentos e sua confiança. Foi uma honra imensa trilhar esse caminho ao seu lado!

“Ser cientista é ser ingênuo. Estamos tão focados em nossa busca pela verdade que deixamos de considerar o quão poucos realmente querem que a encontremos. Mas ela está sempre lá, quer a vejamos ou não, quer a escolhamos ou não... Ela permanecerá à espera por toda a eternidade. E este, enfim, é o legado de Chernobyl. Onde antes eu temia o custo da verdade, agora só me pergunto: qual é o custo da mentira?”

— Valery Legasov, *Chernobyl* (HBO)

RESUMO

Um desastre nuclear caracteriza-se como um evento grave envolvendo materiais ou instalações nucleares, resultando na liberação descontrolada de radiação ionizante no ambiente, sendo capaz de desencadear consequências médicas severas, como a Síndrome Aguda da Radiação (SAR). Considerando o aumento recente das tensões geopolíticas e dos conflitos armados entre nações, observa-se uma elevação na probabilidade de ocorrência de episódios de exposição excessiva à radiação. Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo analisar as principais técnicas de triagem e diagnóstico utilizadas em desastres nucleares, com o propósito de destacar, para os profissionais da saúde, os métodos mais relevantes e aplicáveis em futuras emergências radioativas. A metodologia adotada consistiu em uma revisão de literatura narrativa, realizada a partir da consulta em bases de dados acadêmicos que incluíram artigos científicos, relatórios oficiais e estudos clínicos, publicados entre 1947 e 2025, sendo incluídos estudos que abordassem os métodos de triagem e diagnóstico empregados nos seguintes desastres nucleares: Hiroshima e Nagasaki, Ilhas Marshall, Goiânia, Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima e o envenenamento de Alexander Litvinenko, totalizando 92 publicações analisadas. Os resultados evidenciaram que tais eventos compartilharam abordagens diagnósticas semelhantes, demonstrando uma evolução gradual nas práticas médicas e laboratoriais aplicadas em situações radiológicas. Entre os métodos identificados, destaca-se a biodosimetria citogenética, utilizada para estimar doses de exposição por meio da análise de aberrações cromossômicas. Os exames hematológicos, por sua vez, evidenciaram leucopenia e trombocitopenia como importantes indicadores de comprometimento da medula óssea. Além disso, a dosimetria interna e externa desempenhou papel relevante na quantificação da exposição, abrangendo bioensaios de urina e fezes, dosimetria da tireoide, cintiladores e contadores de corpo inteiro, aplicados conforme o tipo de radionuclídeo e o contexto da exposição. O diagnóstico clínico da SAR foi fundamentado na observação de sinais e sintomas como náuseas, vômitos, febre, diarreia sanguinolenta, alopecia, lesões cutâneas e sangramentos em mucosas, mostrando-se indispensável nos casos mais graves. Dessa forma, verificou-se que, embora os métodos de diagnóstico apresentem fundamentos técnicos comuns, cada desastre nuclear exigiu adaptações específicas, determinadas pela natureza do evento, pela disponibilidade tecnológica e pela urgência da resposta. Conclui-se, portanto, que a integração entre a competência técnica dos profissionais de saúde e o uso criterioso dos métodos de triagem e diagnóstico é essencial para garantir a proteção e a sobrevivência das populações afetadas. Por

fim, ressalta-se a importância de fomentar pesquisas voltadas à prospecção e à modelagem de eventos radiológicos, a fim de fortalecer as estratégias de prevenção, mitigação e resposta em futuras emergências nucleares.

Palavras-chave: Acidente nuclear; Síndrome aguda da radiação; Sintomas; Dosimetria; Citogenética.

ABSTRACT

A nuclear disaster is characterized as a severe event involving nuclear materials or facilities, resulting in the uncontrolled release of ionizing radiation into the environment and capable of triggering serious medical consequences such as Acute Radiation Syndrome (ARS). Considering the recent escalation of geopolitical tensions and armed conflicts between nations, there has been a noticeable increase in the likelihood of excessive radiation exposure incidents. In this context, the present study aimed to analyze the main screening and diagnostic techniques employed in nuclear disasters, with the purpose of highlighting, for healthcare professionals, the most relevant and applicable methods for future radiological emergencies. The adopted methodology consisted of a narrative literature review based on searches in academic databases that included scientific articles, official reports, and clinical studies published between 1947 and 2025. Studies addressing screening and diagnostic methods used in the following nuclear disasters were included: Hiroshima and Nagasaki, Marshall Islands, Goiânia, Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima, and the poisoning of Alexander Litvinenko, totaling 92 publications analyzed. The results revealed that these events shared similar diagnostic approaches, demonstrating a gradual evolution in medical and laboratory practices applied to radiological situations. Among the identified methods, cytogenetic biodosimetry stood out as a key tool for estimating exposure doses through the analysis of chromosomal aberrations. Hematological tests, in turn, showed leukopenia and thrombocytopenia as important indicators of bone marrow impairment. Furthermore, internal and external dosimetry played a crucial role in quantifying radiation exposure, encompassing urine and fecal bioassays, thyroid dosimetry, scintillators, and whole-body counters, applied according to the radionuclide type and exposure context. The clinical diagnosis of ARS, based on the observation of signs and symptoms such as nausea, vomiting, fever, bloody diarrhea, alopecia, skin lesions, and mucosal bleeding, proved indispensable in severe cases. Therefore, it was found that although diagnostic methods share common technical foundations, each nuclear disaster required specific adaptations determined by the nature of the event, technological availability, and response urgency. It is concluded that the integration between the technical competence of healthcare professionals and the judicious use of screening and diagnostic methods is essential to ensure the protection and survival of affected populations. Finally, this study emphasizes the importance of promoting research focused on the prediction and modeling of radiological events, in order to strengthen prevention, mitigation, and response strategies for future nuclear emergencies.

Keywords: Nuclear accident; Acute radiation syndrome; Symptoms; Dosimetry; Cytogenetics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Imagem esquemática do espectro eletromagnético.	22
Figura 2 –	Imagem ilustrativa do poder de penetração dos diferentes tipos de radiação.	23
Figura 3 –	Imagem esquemática sobre o processo de fissão nuclear.	23
Figura 4 –	Esquema dos principais modos de interação da radiação eletromagnética com a matéria.	25
Figura 5 –	Imagem ilustrativa sobre os efeitos diretos e indiretos da RI.	28
Figura 6 –	Imagens das alterações cromossômicas. a) Cromossomo dicêntrico com seu fragmento acêntrico correspondente. b) Os pares de cromossomos 1, 2 e 4 são "pintados" de vermelho e os pares de cromossomos 3, 5 e 6 são "pintados" de verde. Uma translocação recíproca é ilustrada pelos dois cromossomos bicolores (2 e 5) que trocaram segmentos nas extremidades de seus braços longos. c) Exemplos de células binucleadas sem MN, com 1 e com 2 MN.	34
Fluxograma 1 –	Síntese das etapas metodológicas do trabalho.	47
Figura 7 –	Paciente com queda capilar após exposição excessiva de radiação proveniente da bomba atômica.	49
Figura 8 –	Achados patológicos de SAR em sobreviventes da bomba atômica.	50
Figura 9 –	LCIR observada em diferentes pacientes em 1987.	55
Figura 10 –	Dosimetria externa realizada na época do incidente.	55
Figura 11 –	Imagens de cromossomos por microscopia de fluorescência.	56
Figura 12 –	Alexander Litvinenko na UTI 3 dias antes de seu falecimento.	59
Quadro 1 –	Métodos de triagem e diagnóstico observados em desastres nucleares.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Limites anuais de dose conforme recomendações da CNEN.	35
Tabela 2 –	Limites de dose para prevenção de efeitos determinísticos propostos pela IAEA.	36
Tabela 3 –	Limites de dose para reduzir os riscos de efeitos estocásticos propostos pela IAEA.	36
Tabela 4 –	Relação entre categorias da população, o número de pessoas afetadas e a dose média recebida em mSV.	43
Tabela 5 –	Resultados da biodosimetria dos trabalhadores por DCA.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α	Alfa
β	Beta
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APD	Dosímetro Pessoais com Alarme
AWE	Atomic Weapons Establishment
CBMN	Ensaio de Micronúcleo com Bloqueio de Citocinese
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DCA	Ensaio de Cromossomos Dicêntricos
DIC	Cromossomos Dicêntricos
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EUA	Estados Unidos da América
FDNPS	Usina Nuclear de Fukushima-Daiichi
FISH	Hibridização in situ Fluorescente
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
KGB	Comissão de Segurança do Estado da União Soviética
LCIR	Lesão Cutânea Induzida por Radiação
LET	Transferência Linear de Energia
miRNA	Micro Ácido Ribonucleico
MN	Micronúcleo
NIRS	Instituto Nacional de Ciências Radiológicas
NRC	Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos
OSL	Luminescência Opticamente Estimulada
OSLD	Dosímetro de Luminescência Opticamente Estimulada
RBE	Eficiência Biológica Relativa
RBMK	Reator Canalizado de Alta Potência

RI	Radiação Ionizante
SAR	Síndrome Aguda da Radiação
SI	Sistema Internacional
TL	Termoluminescente
TLD	Dosímetros Termoluminescentes
TMI	Three Mile Island
UCH	University College Hospital
WHO	Organização Mundial da Saúde

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1. Justificativa	18
2 OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo Geral	20
2.2. Objetivos Específicos	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1. Radiação Ionizante	21
3.2. Interação da Radiação com a Matéria	24
3.2.1. <i>Interação da Radiação Eletromagnética Ionizante com a Matéria</i>	24
3.2.2. <i>Efeitos Biológicos das RI</i>	25
3.2.2.1. <i>Efeitos Determinísticos/Imediatos</i>	29
3.2.2.2. <i>Efeitos Estocásticos/Tardios</i>	30
3.2.3. <i>Princípio ALARA</i>	30
3.2.4. <i>Dosimetria Física e biológica</i>	31
3.2.4.1. <i>Dosimetria Física</i>	31
3.2.4.2. <i>Biodosimetria</i>	32
3.2.5. <i>Limites de Dose</i>	34
3.3. Desastres Nucleares	36
3.3.1. <i>Testes e Ataques Nucleares</i>	36
3.3.1.1. <i>Hiroshima e Nagasaki (1945)</i>	37
3.3.1.2. <i>Ilhas Marshall (1954)</i>	38
3.3.2. <i>Acidente e Envenenamento Radiológico</i>	38
3.3.2.1. <i>Goiânia (1987)</i>	38
3.3.2.1. <i>Caso Alexander Litvinenko (2006)</i>	39
3.3.3. <i>Acidente Nuclear</i>	41
3.3.3.1. <i>Three Mile Island (1979)</i>	41
3.3.3.2. <i>Chernobyl (1986)</i>	41
3.3.3.3. <i>Fukushima (2011)</i>	44
4 METODOLOGIA	46
5 RESULTADOS	48
5.1. Triagem e Diagnóstico em Desastres Nucleares	48
5.1.1. <i>Hiroshima e Nagasaki</i>	48
5.1.2. <i>Ilhas Marshall: Investigação de exposição interna</i>	50
5.1.3. <i>Chernobyl</i>	51
5.1.4. <i>Goiânia</i>	54
5.1.5. <i>Three Mile Island: Investigação citogenética</i>	57
5.1.6. <i>Caso Alexander Litvinenko</i>	58
5.1.7. <i>Fukushima</i>	60
5.2. Abordagens Diagnósticas Comuns aos Desastres Nucleares	63

6 DISCUSSÃO	66
6.1. Triagem e Diagnóstico	66
6.2. Exames Citogenéticos e Método Padrão-Ouro	72
7 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXO A – TABELA DOS CRITÉRIOS DIAGNÓSTICOS DA SAR EM DIFERENTES PERÍODOS DE SEU DESENVOLVIMENTO	87

1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta da radiação ionizante (RI), a tecnologia nuclear tem sido aplicada em diferentes campos, como na medicina, na indústria e em contextos militares. Em razão do seu crescente uso, a exposição a RI tornou-se uma preocupação, visto o seu potencial de causar danos à saúde e gerar situações catastróficas (IAEA, 2020).

Um desastre nuclear pode ser definido como um evento grave relacionado a materiais ou instalações nucleares, cujo resultado é a liberação descontrolada de RI para o meio ambiente, ocasionando riscos imediatos e de longo prazo, não apenas à saúde humana, mas também ao ecossistema (Ferro, 2014). Tais desastres podem ocorrer por diferentes razões, incluindo acidentes radiológicos, como o episódio de Goiânia, em 1987, envolvendo a exposição direta ao cério-137 (^{137}Cs) (Brasil, 2024); acidentes nucleares, como o de Chernobyl, em 1986, caracterizado pela liberação maciça de radionuclídeos após a explosão do reator (IAEA, 2006); e ainda em contextos de guerra, a exemplo das bombas atômicas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki, em 1945, nas quais a população foi exposta tanto à radiação inicial, emitida no momento da explosão, quanto à residual decorrente da precipitação radioativa (Serrano, 2025). Em síntese, a exposição aguda à RI não programada é considerado acidente ou emergência radiológica (IAEA, 2011 *apud* Leite, 2017).

Por conseguinte, segundo a International Atomic Energy Agency - IAEA (2014), os riscos da radiação para trabalhadores, para o público e para o meio ambiente devem ser avaliados e, se necessário, mitigados, visto que o princípio de radioproteção conhecido como ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), formulado em 1977, estabelece que as exposições à radiação devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente possível (ICRP, 1977 *apud* Yeung, 2019). Isso porque a exposição excessiva à esses compostos pode danificar tecidos e órgãos vivos, dependendo da quantidade absorvida (WHO, 2023), uma vez que o risco de desenvolvimento de efeitos adversos à saúde está diretamente relacionado à dose de radiação recebida. Quanto maior a dose, maior o risco de efeitos deletérios, podendo, em casos graves, levar à morte imediata. Exemplo disso é o acidente na Usina Nuclear de Chernobyl, quando dois funcionários morreram instantaneamente no momento da explosão do reator (Sartayev *et al.*, 2022), além de que, até 2015, foram diagnosticados mais de 20.000 casos de câncer de tireoide entre dois milhões de crianças altamente contaminadas neste acidente (UNSCEAR, 2018 *apud* Sartayev *et al.*, 2022).

Entretanto, os efeitos da radiação não se restringem ao desenvolvimento de câncer. Uma alta exposição à RI pode desencadear outras consequências médicas, como a Síndrome

Aguda da Radiação (SAR), que afeta os sistemas gastrointestinal, hematopoiético e neuromuscular (Donnelly *et al.*, 2010). Tal quadro foi observado no caso de envenenamento radiológico sofrido pelo espião russo Alexander Litvinenko, o qual ingeriu um chá contaminado com polônio-210 (^{210}Po) (Owen, 2016).

Nos últimos três anos, verificou-se um aumento na tensão política global, marcado pela invasão da Rússia à Ucrânia (incluindo ataques à usina de Chernobyl), iniciada em 2022 (BBC News Brasil, 2022); pelos conflitos entre Israel e Gaza, os quais se agravaram em 2023 (G1, 2025); e, mais recentemente, em 2025, pelo ataque dos Estados Unidos à base nuclear do Irã (CNN Brasil, 2025). Durante uma visita à Ucrânia, a equipe da IAEA (2025) indicou que a situação da segurança e proteção nuclear não apresenta melhorias; ao contrário, os riscos têm-se intensificado, logo, o crescente número de conflitos entre países eleva a probabilidade de exposição excessiva à RI (Qian; Cen, 2020 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

A detecção da exposição excessiva à RI é tradicionalmente realizada por meio de dosímetros físicos, como o contador Geiger-Müller. No entanto, os acidentes nucleares evidenciaram a necessidade do desenvolvimento e da aplicação de biomarcadores capazes de detectar a exposição à radiação de forma mais abrangente e eficiente, especialmente em situações nas quais a dosimetria física se mostra indisponível ou pouco confiável. Nesse contexto, alterações em exames hematológicos e a biodosimetria citogenética, por exemplo, podem indicar uma possível contaminação por RI, complementando as análises instrumentais (IAEA, 2020). Assim, torna-se essencial a atuação de profissionais da área da saúde capazes de compreender os sinais clínicos e laboratoriais da contaminação por emissores de radiação, visto que não basta apenas o monitoramento físico por meio do dosímetro, mas também se faz necessária a análise criteriosa de manifestações clínicas e exames laboratoriais.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo analisar as principais técnicas de triagem e diagnóstico utilizadas nos desastres nucleares, a fim de destacar para os profissionais da saúde os métodos mais relevantes e aplicáveis em caso de futuros eventos radioativos.

1.1. Justificativa

O aumento das tensões geopolíticas e do risco de incidentes radiológicos impõe um desafio singular e de grande magnitude aos sistemas de saúde pública global. Consequentemente, em cenários de desastres nucleares, a capacidade de resposta rápida e eficaz é diretamente dependente de uma triagem precisa e de um diagnóstico acurado da dose de radiação ionizante absorvida pelas vítimas. No entanto, embora existam relatos isolados na

literatura, observa-se uma escassez de documentos, tais como manuais técnicos e revisões que integrem e comparem as técnicas laboratoriais e clínicas disponíveis, bem como suas respectivas aplicações em contextos emergenciais. Diante de tal lacuna, este estudo se justifica pela necessidade urgente de sistematizar as informações sobre as principais técnicas de triagem e os métodos diagnóstico padrão-ouro, correlacionando-os com as manifestações clínicas da exposição aguda à radiação. Portanto, este trabalho busca contribuir para a área das Ciências da Saúde ao oferecer uma análise direcionada e atualizada, orientando profissionais da saúde sobre os procedimentos mais adequados para o reconhecimento precoce e diagnóstico em casos de acidentes e incidentes envolvendo exposição à radiação ionizante, fortalecendo, desse modo, a capacidade de atuação em emergências radiológicas e nucleares.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar, por meio de revisão de literatura, as principais técnicas de triagem e diagnóstico utilizadas em casos de exposição a altas doses de radiação ionizante decorrentes de acidentes e ataques nucleares, destacando os métodos de triagem e padrão-ouro e sua aplicabilidade em situações emergenciais de saúde pública.

2.2. Objetivos Específicos

1. Mapear as técnicas de triagem laboratorial descritas na literatura científica para a detecção de contaminação e/ou exposição à radiação ionizante em altas doses;
2. Avaliar os métodos específicos empregados no diagnóstico de exposição aguda à radiação, identificando aqueles reconhecidos como padrão-ouro em biodosimetria;
3. Analisar a relevância e aplicabilidade das técnicas de triagem e diagnóstico para o manejo clínico em futuros acidentes ou eventos nucleares, visando orientar e direcionar a conduta de profissionais de saúde na atuação em cenários críticos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Radiação Ionizante

Os átomos são os constituintes básicos da matéria, sendo formados por um núcleo composto de prótons e nêutrons, rodeado por elétrons. Em virtude disso, um nuclídeo é um átomo que possui um número específico de prótons e nêutrons em seu núcleo. Contudo, os chamados isótopos são átomos de um mesmo elemento, os quais assemelham-se pelo número de prótons, mas diferem em massa e em número de nêutrons (Tauhata *et al.*, 2013).

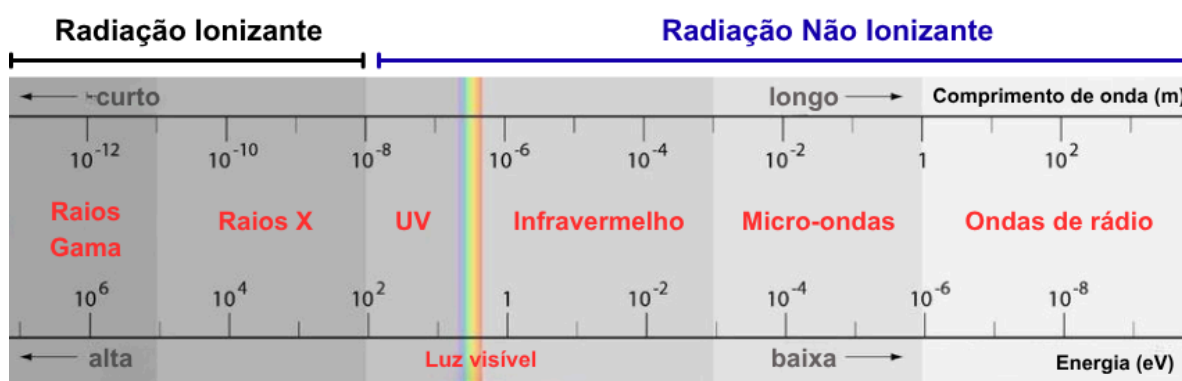
É válido ressaltar que alguns desses nuclídeos são estáveis, enquanto outros são instáveis, sendo chamados de radioisótopos ou radionuclídeos. Os radionuclídeos sofrem um processo chamado de decaimento radioativo, no qual o núcleo instável é sujeito a transformações aleatórias, perdurando até que ele atinja a estabilidade. Contudo, apesar de aleatórias, o número de mudanças por segundo é proporcional ao número de átomos ainda não transformados, demonstrando que a chance de decaimento de um átomo por unidade de tempo permanece constante, independentemente do tempo de existência do radionuclídeo. Essa taxa característica é denominada constante de decaimento (λ) e possui grande importância, pois permite descrever matematicamente o comportamento e estimar a estabilidade do radioisótopo ao longo do tempo (Tauhata *et al.*, 2013). É válido ressaltar que o Becquerel (Bq) é definido como a unidade de medida do decaimento radioativo, sendo utilizado para quantificar o grau de radioatividade de determinados isótopos e a duração de sua atividade radioativa (Collum, 2017).

Em síntese, as radiações originam-se de procedimentos de ajustes no núcleo ou nas suas camadas, bem como da interação de outras radiações ou partículas com o núcleo ou com o átomo (Tauhata *et al.*, 2013), sendo capazes de emitir energia na forma de ondas ou partículas. De forma geral, a radiação é classificada em dois tipos: não ionizante e ionizante (Galindo, 2023). As ondas de rádio, microondas, infravermelho, luz visível e ultravioleta (**Figura 1**) são denominadas radiações não ionizantes por não possuírem energia suficiente para remover um elétron de um átomo-alvo. Por outro lado, a radiação ionizante possui energia capaz de arrancar um elétron orbital de um átomo, tornando-o positivamente carregado e, como resultado, representa uma ameaça biológica significativa (Kearns; Hickerson; Carter, 2023).

Ademais, a RI também pode ser classificada em dois grupos. O primeiro corresponde à radiação corpuscular, a qual consiste na emissão de partículas dotadas de massa, que podem ou não possuir carga elétrica. Entre os principais exemplos estão as partículas alfa (α), beta

(β) e o nêutron (Okuno, 2007 *apud* Vasconcelos; Garcia, 2009). O segundo tipo é a radiação eletromagnética, constituída por vibrações simultâneas de campos elétrico e magnético, perpendiculares entre si, geradas durante transições de energia relacionadas à movimentação de cargas e momentos magnéticos das partículas. As radiações eletromagnéticas ionizantes de maior relevância são os raios X e a radiação gama (**Figura 1**) (Tauhata *et al.*, 2013).

Figura 1 – Imagem esquemática do espectro eletromagnético.

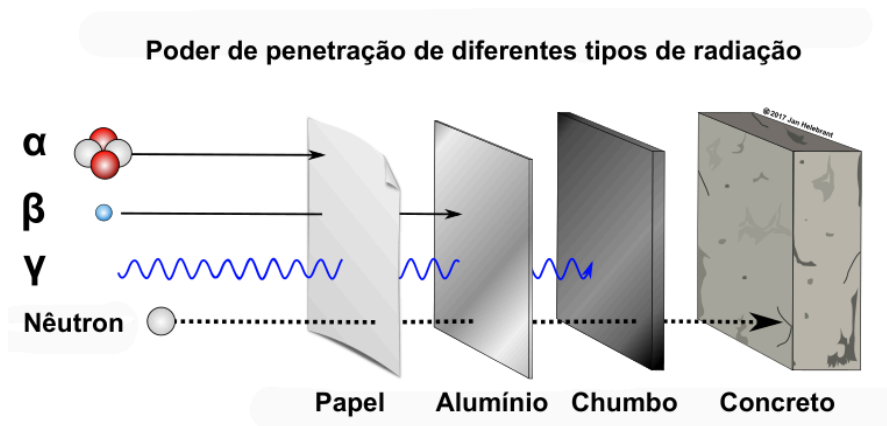


Fonte: Modificado de Verhoeven, 2017.

As partículas α contêm dois prótons e dois nêutrons e possuem carga positiva de +2, consistindo em núcleos de hélio. Como exemplificado na figura 2, elas apresentam mínima capacidade de penetração, sendo bloqueadas por uma simples folha de papel, razão pela qual dificilmente penetram nas camadas externas da pele (IARC, 2000). Embora não representem uma ameaça externa significativa, emissores de radiação α podem ser perigosos se internalizados por meio de contaminação de feridas, inalação ou ingestão (Kearns; Hickerson; Carter, 2023). Já as β não costumam representar risco significativo se não permanecerem em contato prolongado com a pele (Kearns; Hickerson; Carter, 2023), visto que consistem em elétrons de alta energia que podem penetrar até 2 cm de tecido vivo (IARC, 2000). Em geral, uma lâmina de alumínio (**Figura 2**) com alguns milímetros de espessura é suficiente para bloquear a radiação β (Galindo, 2023).

Em contrapartida, os raios gama, por serem fótons, parte deles pode atravessar o corpo humano sem causar danos, enquanto outros são absorvidos, ocasionando lesões (IARC, 2000). A intensidade dos raios gama pode ser atenuada a níveis de menor risco por meio de barreiras espessas de concreto ou chumbo (**Figura 2**), o que justifica a estrutura robusta das salas de tratamento radioterápico em hospitais (Galindo, 2023).

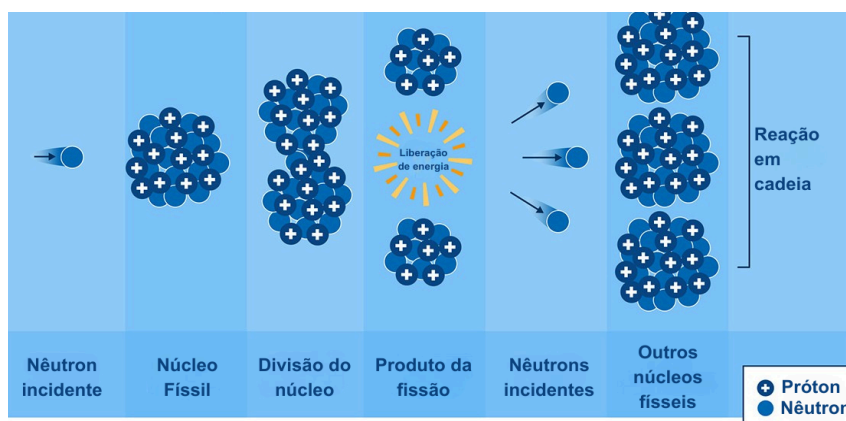
Figura 2 – Imagem ilustrativa do poder de penetração dos diferentes tipos de radiação.



Fonte: Modificado de Juhele, 2017 *apud* Devi, 2025.

Por fim, os nêutrons são partículas relativamente massivas que compõem o núcleo atômico e não produzem ionização direta, pois não possuem carga elétrica. Contudo, sua interação com os átomos da matéria, pode produzir reações nucleares ou capturas que produzem partículas carregadas (α e β) e emissão de raios gama, além disso partículas secundárias podem também gerar raios-X. Os nêutrons apresentam alto poder de penetração, sendo bloqueados apenas por grandes massas de concreto (**Figura 2**), água ou parafina (Galindo, 2023). Embora rara, esse tipo de radiação é a única capaz de tornar outros materiais radioativos por meio de um processo denominado ativação por nêutrons (Kearns; Hickerson; Carter, 2023). Além disso, tais partículas podem ser produzidas de diferentes formas, tais como em reatores nucleares ou em reações iniciadas por partículas de alta energia em feixes de aceleradores. Um exemplo claro desse processo é a fissão nuclear (**Figura 3**) em reatores, caracterizada por uma reação em cadeia sustentada por nêutrons (Galindo, 2023).

Figura 3 – Imagem esquemática sobre o processo de fissão nuclear.



Fonte: Modificado de Vargas, 2022 *apud* Galindo, 2022.

3.2. Interação da Radiação com a Matéria

As radiações consistem em processos de transferência de energia sob a forma de partículas ou ondas eletromagnéticas que, ao interagir com a matéria, ocasionam a transferência dessa energia para os átomos e moléculas presentes em sua trajetória (Xavier; Moro; Heilbron, 2006). Quando partículas carregadas ou radiações eletromagnéticas atravessam um material, o principal mecanismo responsável pela perda de energia é a interação com os elétrons. Isso se explica pelo fato de que o raio do núcleo atômico é aproximadamente 10.000 vezes menor que o raio do átomo, fazendo com que as interações com elétrons sejam muito mais numerosas que aquelas ocorridas com núcleos, sendo o número de interações proporcional à área projetada, ou seja, ao raio elevado ao quadrado (Xavier; Moro; Heilbron, 2006).

No caso específico das partículas carregadas, esse fenômeno pode ser facilmente observado a partir da dispersão que tais partículas sofrem ao interagir com a matéria. As partículas mais pesadas, como a α , sofrem pequenos desvios em sua trajetória original, perdendo gradualmente energia, enquanto as partículas β , por apresentarem menor massa, são desviadas em ângulos significativamente maiores ao interagirem com o meio. (Xavier; Moro; Heilbron, 2006).

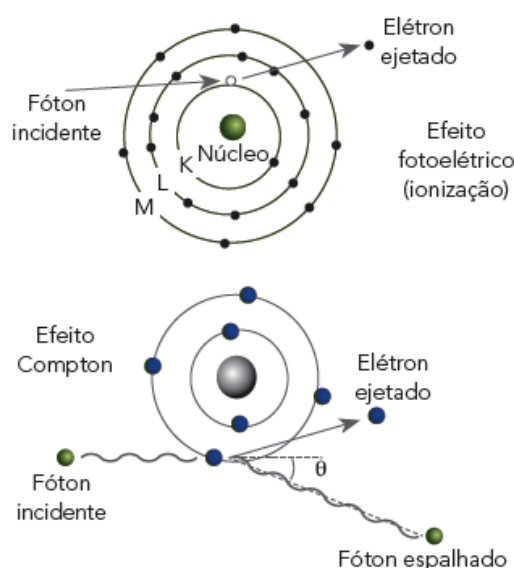
3.2.1. Interação da Radiação Eletromagnética Ionizante com a Matéria

As radiações eletromagnéticas ionizantes apresentam elevado poder de penetração, sendo capazes de atravessar grandes espessuras de material antes de sofrerem sua primeira interação. Tal poder está diretamente relacionado à probabilidade de ocorrência de choque dos diferentes tipos de interações capazes de absorver ou propagar a radiação incidente, sendo a penetrabilidade dos raios X e gama muito superior à das partículas α e β . É válido ressaltar que, a chance de interação da RI com a matéria varia conforme a energia do fóton incidente (Tauhata *et al.*, 2013).

A radiação eletromagnética pode interagir com a matéria por meio do efeito fotoelétrico, do efeito Compton e da produção de pares (Tauhata *et al.*, 2013). No efeito fotoelétrico (**Figura 4**), o fóton é completamente absorvido pelo átomo, liberando um elétron atômico que passa a se mover no material. A energia cinética adquirida por esse elétron corresponde à diferença entre a energia do fóton incidente e a energia que o elétron produz ao se ligar ao átomo (Yoshimura, 2009). Já no efeito Compton, o fóton interage com um elétron periférico do átomo, transferindo-lhe apenas parte de sua energia. Como resultado, ocorre a emissão de um fóton secundário, de menor energia, que continua sua trajetória dentro do

material em uma direção diferente da original (Xavier; Moro; Heilbron, 2006), como observado na figura 4. Por fim, a produção de pares representa uma forma predominante de absorção da radiação eletromagnética de alta energia, também denominada formação de par elétron-pósitron. Esse fenômeno ocorre quando fótons com energia superior a 1,02 MeV passam próximos a núcleos de elevado número atômico, interagindo com o intenso campo elétrico nuclear. Nessa interação, o fóton é aniquilado e sua energia é convertida em um par elétron-pósitron (Xavier; Moro; Heilbron, 2006).

Figura 4 – Esquema dos principais modos de interação da radiação eletromagnética com a matéria.



Fonte: Zattar; Viana; Cerri, 2022.

3.2.2. Efeitos Biológicos das RI

Com relação aos efeitos biológicos das RI, faz-se antes necessário compreender as grandezas dosimétricas que as envolvem, visto que elas permitem avaliar as implicações da interação da radiação com a matéria, além de indicar o risco à saúde humana. Dentre elas estão: dose absorvida, dose equivalente e dose efetiva (Tauhata *et al.*, 2013).

A fração de energia efetivamente absorvida está relacionada à ionização dos átomos, à quebra de ligações químicas e ao aumento da energia cinética das partículas. Desse modo, a dose absorvida é a energia depositada pela RI em dado volume de matéria, pela massa desse (Tauhata *et al.*, 2013). No Sistema Internacional (SI), a unidade designada é o gray (Gy) (CNEN, 2024) ou, a unidade antiga, o rad (*radiation absorbed dose*), no qual $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ (Tauhata *et al.*, 2013).

Para fins de radioproteção, a dose equivalente (HT) refere-se à dose em um tecido ou órgão específico, definida pela expressão $HT = \sum R DT_{R,T} \cdot w_R$, em que $DT_{R,T}$ representa a dose absorvida média no volume de um órgão ou tecido T, resultante da radiação R incidente ou emitida por radionuclídeos incorporados, e w_R é o fator de peso correspondente ao tipo de radiação. A unidade adotada é denominada sievert (Sv) (CNEN, 2024), ou, pela unidade antiga, o rem (*roentgen equivalent man*), sendo que 1 Sv corresponde a 100 rem (Tauhata *et al.*, 2013). Por fim, a dose efetiva (E) é uma grandeza que considera a sensibilidade variável dos diferentes tecidos e órgãos à RI, sendo calculada pela expressão $E = \sum T HT \cdot w_T$, na qual HT é a dose equivalente em um tecido ou órgão T, e w_T representa o fator de peso correspondente a esse órgão ou tecido. Assim como a HT, sua unidade é a Sv (CNEN, 2024).

Outro efeito conceito em radiobiologia é a transferência de energia. Tal grandeza é denominada Transferência Linear de Energia (LET), normalmente expressa em keV/μm, e varia de forma complexa em função da massa, da energia e da carga da RI (Xavier; Moro; Heilbron, 2006).

Radiações eletromagnéticas e as partículas β apresentam baixa probabilidade de interação com os átomos do meio irradiado, produzindo irradiações mais espaçadas ao longo de sua trajetória. Em contrapartida, partículas α, prótons e nêutrons, por serem pesadas, liberam sua energia em trajetórias mais curtas, devido à maior probabilidade de colisão com os átomos do meio (Xavier; Moro; Heilbron, 2006). Assim, a LET descreve a taxa de energia transferida por unidade de comprimento da trajetória da radiação, sendo os raios X e gama classificados como radiações de baixo LET, enquanto partículas α são de alto LET (Murshed, 2019).

Desse modo, em valores elevados de LET, ocorrem numerosos eventos de ionização em uma mesma área-alvo, aumentando consideravelmente a probabilidade de efeitos biológicos adversos, mesmo em doses reduzidas. Por outro lado, valores baixos de LET provocam ionizações mais espaçadas, o que possibilita a reparação molecular e reduz o potencial de dano biológico (Xavier; Moro; Heilbron, 2006).

A dose absorvida, como outrora mencionada, representa uma grandeza física que apresenta boa correlação com o efeito biológico. Entretanto, quando a qualidade da radiação varia, por exemplo, de raios X para nêutrons, o efeito biológico resultante pode diferir, ou seja, doses idênticas podem produzir efeitos distintos em um mesmo tecido ou órgão (Xavier; Moro; Heilbron, 2006). Consequentemente, a fim de caracterizar essas diferenças, foi introduzido o conceito de Eficiência Biológica Relativa (RBE), a qual é definida como a razão entre a dose de uma radiação de referência capaz de produzir determinado efeito biológico e a

dose da radiação em estudo necessária para provocar o mesmo efeito. A radiação mais utilizada como referência em experimentos é a radiação X filtrada (camada semi-redutora de 1,5 mm de cobre), com tensão de 200 kV (pico) (Xavier; Moro; Heilbron, 2006), sendo a camada semi-redutora definida como a espessura de material necessária para reduzir pela metade a intensidade do feixe incidente (Tauhata *et al.*, 2013).

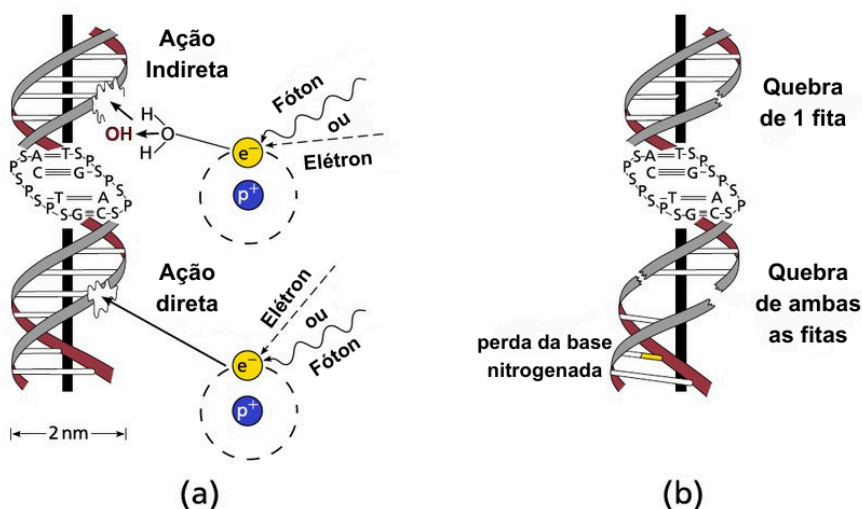
A RBE depende não apenas da qualidade da radiação, mas também do tipo de efeito biológico observado. Quando o valor da RBE de uma radiação, como a α , é comparado ao de outra, como a gama, o resultado representa a razão inversa das doses absorvidas que produzem a mesma magnitude de efeito biológico (Xavier; Moro; Heilbron, 2006).

Além disso, os fatores de ponderação de dose, amplamente utilizados em proteção radiológica, foram definidos para refletir a RBE de cada tipo de radiação em induzir efeitos observáveis. Essa eficiência está diretamente relacionada à qualidade da radiação, expressa em termos de LET (Xavier; Moro; Heilbron, 2006). De forma geral, a RBE máxima é observada em valores de LET próximos de 100 keV/ μ m. Acima desse valor, particularmente em LET superiores a 200 keV/ μ m, a densidade de ionização nas células torna-se maior do que o necessário para a morte celular ótima, o que faz com que a RBE diminua em radiações de LET muito alto (Murshed, 2019).

Sabendo-se disso, uma pessoa pode ser exposto a RI por meio da irradiação, quando o corpo é apenas exposto à radiação emitida por uma fonte externa, ou por meio da contaminação interna, que ocorre quando partículas radioativas interagem diretamente com o organismo, seja pela pele, pela inalação, ingestão ou ainda por ferimentos. É importante destacar que a irradiação não implica em contaminação. Nesse sentido, um indivíduo irradiado, mas não contaminado, não oferece risco direto às pessoas ao seu redor. Diferentemente, um paciente contaminado carrega o material radioativo consigo, tornando necessária a adoção de medidas de contenção e proteção a fim de evitar a dispersão dos radionuclídeos (Kearns; Hickerson; Carter, 2023).

Dessa forma, a radiação ionizante pode agir de forma direta ou indireta sobre as moléculas-alvo, como observado na figura 5a. Os efeitos indiretos ocorrem quando a radiação interage com moléculas de água presentes no corpo, formando radicais livres reativos em um processo denominado radiólise da água. Em virtude da alta reatividade desses radicais, há possibilidade de interferência no metabolismo de outras biomoléculas essenciais, como DNA, RNA, proteínas, lipídeos e carboidratos, podendo, em estágios mais avançados, culminar na morte celular (Garcia, 2015).

Figura 5 – Imagem ilustrativa sobre os efeitos diretos (b) e indiretos (a) da RI.



Fonte: Modificado de Richter, 2012 *apud* Müssig, 2014.

Por outro lado, quando a energia da radiação é absorvida diretamente por moléculas de relevância nos processos metabólicos celulares, como o Ácido Desoxirribonucleico (DNA) e enzimas, esse processo é denominado efeito direto (Garcia, 2015). Dessa forma, os efeitos biológicos provocados pelas RIs podem ser somáticos, quando se manifestam no próprio indivíduo, ou genéticos, quando afetam o material genético das células reprodutivas, resultando em mutações transmissíveis às gerações seguintes (BEIR V, 1990).

A RI é capaz de provocar diferentes tipos de lesões moleculares no DNA. Entre elas destacam-se as alterações nas bases nitrogenadas, como a perda de purinas ou pirimidinas, resultando na formação de sítios apurínicos e apirimidínicos. Além disso, radicais livres e hidroxilas podem promover modificações estruturais em adenina e guanina, bem como oxidação de timina e citosina, que leva à formação de peróxidos e produtos derivados, como pirimidina-glicol e fragmentos de ureia incorporados ao DNA. Outro efeito relevante é a ruptura das cadeias polinucleotídicas, que pode ocorrer de forma simples, afetando apenas uma das fitas (**Figura 5b**), ou de forma dupla, atingindo ambas as hélices (**Figura 5b**). A radiação também pode induzir a formação de ligações cruzadas (cross-linking) entre diferentes regiões do DNA ou entre DNA e proteínas, além de romper pontes de hidrogênio, o que resulta em alterações da conformação espacial da macromolécula (Garcia, 2015).

Além de provocar radiólise da água e danos diretos ao DNA, as RIs também podem afetar proteínas e aminoácidos por ação direta ou indireta. Essas alterações estruturais podem levar à inativação funcional ou até mesmo à conversão de um aminoácido em outro, estando entre os mais suscetíveis: triptofano, cistina, cisteína, fenilalanina e tirosina (Garcia, 2015).

De forma sucinta, os efeitos radioinduzidos podem receber diferentes denominações: estocásticos e determinísticos; imediatos e tardios (Tauhata *et al.*, 2013).

3.2.2.1. Efeitos Determinísticos/Imediatos

Os efeitos determinísticos manifestam-se em um curto intervalo de tempo (minutos a dias) e ocorrem a partir de um valor de dose limiar, sendo sua gravidade proporcional ao aumento dessa dose (Xavier; Moro; Heilbron, 2006). Tais efeitos resultam da irradiação total ou localizada de um tecido, ocasionando um grau de morte celular em que os processos de reparo tornam-se incapazes de restaurar a célula, o que leva a prejuízos detectáveis na atividade funcional do tecido ou órgão. Por conseguinte, abaixo do limiar de dose, a perda celular é insuficiente para provocar alterações funcionais perceptíveis (Tauhata *et al.*, 2013). Entre as manifestações clínicas dos efeitos somáticos imediatos, destacam-se a lesão cutânea induzida por radiação (LCIR) e a SAR.

A LCIR caracteriza-se como uma forma de queimadura decorrente da exposição aguda da pele à RI de alta intensidade. Esse efeito ocorre com doses cutâneas a partir de 3,0 Gy e diferencia-se das queimaduras térmicas pelo tempo de desenvolvimento, podendo levar até duas semanas para se manifestar. A fisiopatologia da LCIR está associada ao dano causado à camada de células basais da pele. Além disso, a presença dessa lesão deve sempre motivar a investigação de uma possível SAR, uma vez que qualquer paciente que apresente LCIR pode ser indicativo de que houve exposição de regiões do corpo ou corpo inteiro que leve à SAR (Kearns; Hickerson; Carter, 2023).

A SAR, também denominada doença da radiação, constitui numa patologia aguda resultante da irradiação de todo o corpo ou da maior parte dele. Essa exposição, quando igual ou superior a 1 Gy, geralmente ocorre em um curto intervalo de tempo, frequentemente em questão de minutos (Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024). Além disso, um dos maiores desafios relacionados ao seu diagnóstico consiste na ausência de sinais ou sintomas característicos, pois não existem achados físicos patognomônicos que possam ser diretamente associados às doenças induzidas por radiação ionizante. Do ponto de vista fisiopatológico, a SAR está intrinsecamente ligada à radiosensibilidade celular, a qual varia entre diferentes tipos de células. Essa diferença de sensibilidade fundamenta a divisão clássica da síndrome em três manifestações principais, que, embora distintas, compõem um espectro contínuo de doença: a síndrome hematopoiética, a síndrome gastrointestinal e a síndrome neurovascular (Donnelly *et al.*, 2010).

3.2.2.2. Efeitos Estocásticos/Tardios

Os efeitos estocásticos, por sua vez, são aqueles cuja probabilidade de ocorrência aumenta em função da dose recebida, não apresentando um valor limiar. Dessa forma, qualquer indivíduo exposto à radiação possui uma probabilidade de desenvolver determinados efeitos relacionados à exposição, os quais tendem a se manifestar apenas após um longo período de tempo, que pode abranger várias décadas após o evento de irradiação (Xavier; Moro; Heilbron, 2006).

Os efeitos somáticos tardios da RI podem ter impacto significativo no desenvolvimento de cânceres primários e secundários. Em tecidos não irradiados, pode ocorrer o chamado efeito não alvo (efeito bystander), decorrente da liberação de fatores clastogênicos provenientes de células irradiadas. Essa secreção resulta da ativação de vias de sinalização desencadeadas por danos ao DNA e pela morte celular, configurando um quadro de disfunção epigenética. (Talapko *et al.*, 2024).

3.2.3. Princípio ALARA

Como brevemente mencionado, com o aumento da utilização das RI, alinhada à evolução do conhecimento sobre seus efeitos biológicos, surgiram preocupações acerca da segurança associada à exposição à radiação.

Nesse contexto, o princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable* – Tão Baixo Quanto Razoavelmente Possível) consolidou-se como um dos pilares da proteção radiológica, ao estabelecer que as exposições à RI devem ser mantidas no menor nível possível, desde que compatíveis com os benefícios esperados de ordem econômica e social (Hendee; Edwards, 1986). A origem desse conceito remonta às recomendações iniciais da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), que, desde a década de 1950, já enfatizava a urgência de reduzir as exposições aos diferentes tipos de RI ao nível mais baixo praticável (ICRP, 1951 *apud* Yeung, 2019). Com o avanço do conhecimento sobre os efeitos biológicos da radiação, a ICRP aperfeiçoou essa diretriz até consolidá-la, em 1977, sob a forma do princípio ALARA (ICRP, 1977 *apud* Yeung, 2019). A Comissão também propôs um sistema de limitação de dose baseado em três fundamentos: a justificativa da prática, a otimização da exposição e o respeito aos limites de dose recomendados, moldando a proteção radiológica como um sistema de tomada de decisão que busca o equilíbrio entre benefícios, custos e riscos (Hendee; Edwards, 1986).

3.2.4. Dosimetria Física e biológica

3.2.4.1. Dosimetria Física

A dosimetria consiste na determinação da exposição ou da dose de radiação do ambiente ou do corpo humano (Lalic, 2019). Nesse contexto, o dosímetro físico de radiação é o instrumento utilizado para medir ou avaliar, de forma direta ou indireta, grandezas como exposição, dose absorvida ou dose equivalente, além de suas taxas. Portanto, o conjunto formado pelo dosímetro e seu leitor é denominado sistema de dosimetria (Izewska; Rajan, 2005).

Para que um dispositivo funcione adequadamente como dosímetro de radiação, ele deve apresentar pelo menos um efeito físico que seja proporcional à grandeza dosimétrica medida e que possa ser calibrado de forma adequada. Dessa forma, é essencial que o dosímetro apresente alta exatidão e precisão, boa linearidade, resposta estável à energia e à taxa de dose, dependência direcional controlada e resolução espacial adequada, permitindo a determinação precisa da dose absorvida em um ponto específico e a estimativa da distribuição da dose em tecidos e órgãos de interesse (Izewska; Rajan, 2005).

Segundo Lalic (2019), atualmente, há uma ampla variedade de dosímetros utilizados, especialmente nas áreas de dosimetria pessoal e clínica, com destaque para os dispositivos baseados em materiais termoluminescentes (TL), amplamente empregados em proteção radiológica ambiental, médica e espacial. Dentre esses, os dosímetros termoluminescentes (TLD) se consolidaram desde a década de 1940 como o método mais difundido, em razão do baixo custo, alta confiabilidade e boa reprodutibilidade na medição da dose absorvida por radiações ionizantes de baixo LET. O TLD mais comum é o LiF:Mg,Ti, conhecido comercialmente como TLD-100 (Lalic, 2019).

Com o avanço tecnológico, os TLDs vêm sendo gradualmente substituídos por métodos de estimulação óptica, como a Luminescência Opticamente Estimulada (OSL). Embora mais recente, a técnica OSL já apresenta aplicação comercial com dois principais materiais: o $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$, amplamente utilizado, e o BeO, cuja adoção tem aumentado. Outra técnica óptica de destaque é a Radiofotoluminescência, que tem a vantagem de preservar a informação durante a leitura, embora seu uso seja restrito ao dosímetro de vidro de fosfato ativado com prata (GD-352M), amplamente empregado no Japão. De modo semelhante, a técnica de Ressonância de Spin Eletrônico também permite leituras não destrutivas, porém com sensibilidade geralmente inferior à observada nas técnicas de TL e OSL (Lalic, 2019).

Por fim, observa-se recentemente um crescente interesse na utilização de dosímetros cintiladores de plástico, devido às suas características vantajosas em relação a outros sistemas, pois esses dispositivos apresentam uma relação linear entre a dose absorvida e o sinal produzido, além de boa sensibilidade, independência em relação à taxa de dose, possibilidade de leitura direta e capacidade de reutilização devido à sua resistência e durabilidade. Entre os exemplos estudados destacam-se o BC-404, o BCF-60 e o Exradin W1, sendo este último empregado em aplicações de protonterapia (Lalic, 2019).

3.2.4.2. Biodosimetria

Em situações de exposição acidental à radiação, quando a estimativa e determinação da dose são realizadas com base em marcadores biológicos, utiliza-se a biodosimetria, e tais marcadores são denominados biomarcadores de exposição. Nas últimas décadas, o interesse na identificação de biomarcadores em resposta à radiação tem aumentado significativamente, uma vez que esses estudos também contribuem para a compreender quais os riscos a longo prazo, tanto da exposição aguda quanto da crônica (Rana *et al.*, 2010).

Em síntese, segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO) (1993 *apud* Pernot *et al.*, 2012) um biomarcador é definido como “qualquer medida que reflita a interação entre um sistema biológico e um agente ambiental, seja ele químico, físico ou biológico”. Desse modo, os marcadores biológicos podem ter múltiplas aplicações em investigações epidemiológicas, incluindo a estimativa ou validação da dose recebida, aprimorando, assim, a correlação entre exposição e resposta biológica; a investigação da suscetibilidade individual; e a detecção precoce de efeitos adversos à saúde induzidos pela radiação (Pernot *et al.*, 2012). Sabendo-se disso, para que um biomarcador seja adequado para as análises, é necessário que ele cumpra uma série de pré-requisitos (Castro-Volio, 2013). Entre eles, estão:

a. O intervalo de tempo após a exposição em que são úteis, b. Ensaios simples e rápidos, c. Aplicáveis a grandes populações, d. Boa dependência da dose, tanto in vivo como in vitro, e. Variação mínima na faixa normal de indivíduos não irradiados, f. Específico para radiações ou com poucos fatores de confusão (Castro-Volio, 2013).

Dessa forma, entre os biomarcadores, destacam-se as amostras biológicas, visto que permitem a medição indireta da exposição ao determinar a concentração de radionuclídeos em fluidos corporais, como urina, fezes e sangue (IAEA, 2000).

A urina é amplamente utilizada, pois os rins filtram radionuclídeos presentes no sangue e os excretam, permitindo sua detecção e monitoramento. Da mesma forma, as

amostras fecais contêm resíduos provenientes do trato gastrointestinal e detritos celulares, refletindo tanto material não absorvido quanto substâncias excretadas (IAEA, 2000).

O sangue periférico, composto por hemácias, leucócitos e plaquetas, também é amplamente utilizado na biodosimetria (IAEA, 2000), uma vez que o exame hematológico e a análise morfológica do esfregaço sanguíneo permite a avaliação quantitativa e qualitativa das diferentes linhagens celulares. Especificamente, os leucócitos, originados de células-tronco hematopoiéticas na medula óssea, são divididos em linhagens mielóides e linfóides (Calado; Falcão, 2013). As células mielóides são menos radiosensíveis (Pham *et al.*, 2023), enquanto os linfócitos são altamente sensíveis à radiação, o que os torna excelentes bioindicadores (Heylmann *et al.*, 2021 *apud* Kermenguy *et al.*, 2023) devido sua propensão de ativar uma resposta ao dano e sofrer apoptose mesmo diante de pequenas lesões no DNA (Paganetti, 2023).

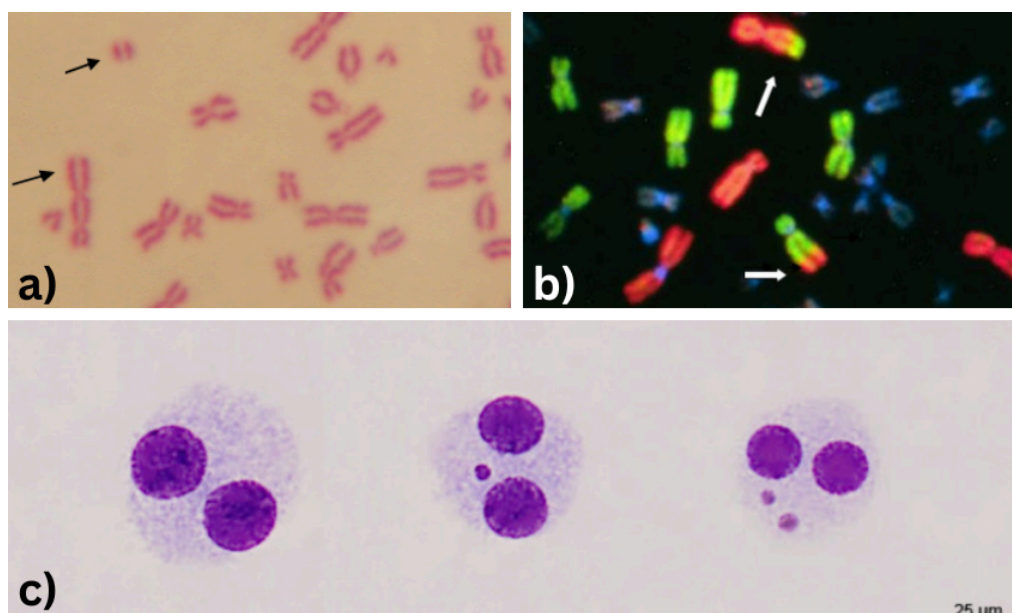
Os danos aos linfócitos periféricos, como aberrações cromossômicas, também são amplamente empregados como biodosímetros (Paganetti, 2023). Alguns tipos de mutações e aberrações estão fortemente associados à exposição à radiação, principalmente às de alto LET, que causa deposição densa de energia no DNA. Apesar dos mecanismos de reparo celular, certos danos podem persistir, originando aberrações cromossômicas observáveis durante a metáfase da mitose. Essas lesões podem ser estáveis ou instáveis: as estáveis permanecem detectáveis por longos períodos, permitindo estimar exposições passadas; já as instáveis podem ser letais para a célula e desaparecem conforme as divisões celulares (Rana *et al.*, 2010).

Entre as aberrações instáveis, destacam-se os cromossomos dicêntricos (DIC), resultantes da troca das extremidades dos braços cromossômicos (telômeros) quebrados entre dois cromossomos rompidos, acompanhados de fragmentos acêntricos, como pode ser observado na figura 6a. Em doses elevadas, podem surgir configurações multicêntricas, como tricêntricos e quadricêntricos. O nível basal de dicêntricos em indivíduos não expostos situa-se entre 0,5 e 1,0 por mil células. Por outro lado, dentre as aberrações estáveis, estão as translocações recíprocas, caracterizadas pela troca de segmentos terminais entre cromossomos distintos (**Figura 6b**) (IAEA, 2011).

Outro parâmetro importante é a formação de micronúcleos (MN), originados de fragmentos cromossômicos ou cromossomos inteiros que não são incorporados aos núcleos das células-filhas durante a anáfase, sendo consideradas também aberrações instáveis. Observam-se na figura 6c como pequenas estruturas esféricas no citoplasma, semelhantes em morfologia e coloração aos núcleos principais. A frequência basal de MN varia amplamente

(0 a 40 por mil células binucleadas), influenciada por fatores como idade, gênero, dieta e exposição a agentes ambientais (IAEA, 2011).

Figura 6 – Imagens das alterações cromossômicas. a) Cromossomo dicêntrico com seu fragmento acêntrico correspondente. b) Os pares de cromossomos 1, 2 e 4 são "pintados" de vermelho e os pares de cromossomos 3, 5 e 6 são "pintados" de verde. Uma translocação recíproca é ilustrada pelos dois cromossomos bicolors (2 e 5) que trocaram segmentos nas extremidades de seus braços longos. c) Exemplos de células binucleadas sem MN, com 1 e com 2 MN.



Fonte: Modificado de IAEA, 2011.

3.2.5. Limites de Dose

A limitação das doses de exposição à RI constitui um dos pilares da proteção radiológica, sendo regida por normas e resoluções que visam preservar a saúde tanto dos trabalhadores ocupacionalmente expostos quanto do público em geral. No Brasil, essas diretrizes são definidas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), por meio da Resolução RDC nº 611, e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), através da Norma NN 3.01, ambas com regulamentações complementares que orientam as práticas seguras de exposição e controle radiológico (Brasil, 2022; CNEN, 2024). Em razão disso, a tabela 1, proporcionada pela CNEN (2024), especifica os limites de doses anuais que devem ser seguidos para indivíduos expostos de maneira ocupacional e para a população geral.

Tabela 1 – Limites anuais de dose conforme recomendações da CNEN.

Limites de Doses Anuais			
Grandeza	Órgão	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto	Indivíduo do público
Dose Efetiva	Corpo Inteiro	20 mSv	1 mSv
Dose Equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	—

Fonte: Modificado de CNEN, 2024.

De acordo com a RDC n° 611 (Brasil, 2022), as exposições provenientes de procedimentos radiológicos devem ser controladas de forma que não ultrapassem os limites estabelecidos pela CNEN. Ainda segundo o Art. 49 da mesma resolução, os níveis anuais de dose equivalente são de 0,5 mSv para áreas livres e 5 mSv para áreas controladas. Tais limites visam garantir que a exposição ambiental permaneça dentro de parâmetros seguros, compatíveis com o princípio ALARA. Além disso, a RDC n° 611 também estabelece medidas de investigação e resposta em casos de doses que excedam os níveis previstos. Conforme o Art. 69, o responsável legal pelo serviço de radiologia diagnóstica ou intervencionista deve iniciar uma investigação sempre que as doses atingirem ou ultrapassem os níveis de investigação definidos pela CNEN, ou quando houver notificação da autoridade sanitária competente. Essa investigação deve ser documentada e comunicada oficialmente nos casos em que a dose efetiva mensal superar 20 mSv. Caso os valores mensais ultrapassem 100 mSv, é obrigatória a realização de avaliação clínica e exames complementares (Brasil, 2022).

Em situações de emergência radiológica, a CNEN NN 3.01 (Art. 113) prevê limites diferenciados para os trabalhadores de emergência, que podem receber doses superiores a 50 mSv apenas em circunstâncias específicas, como para salvar vidas, evitar danos graves à saúde coletiva, reduzir doses coletivas elevadas ou prevenir efeitos determinísticos severos e situações catastróficas. Nessas condições, apenas voluntários devidamente informados e treinados podem atuar, sendo obrigatoriamente orientados quanto aos riscos à saúde e às medidas de proteção disponíveis. Os limiares associados aos efeitos determinísticos e estocásticos devem, ainda, ser respeitados conforme indicado nas tabelas 2 e 3 (IAEA 2014; 2015 *apud* CNEN, 2024).

Tabela 2 – Limites de dose para prevenção de efeitos determinísticos propostos pela IAEA.

Exposição externa aguda (<10 h) (DA = dose absorvida média)	Limiares	Exposição interna aguda devido a uma ingestão aguda (t = 30 dias)	Limiares
DA _{medula óssea vermelha}	1 Gy	DA(t) _{medula óssea vermelha}	0,2 Gy para radionuclídeos com n° atômico Z ≥ 90 2 Gy para radionuclídeos com n° atômico Z ≤ 89
DA _{feto}	0,1 Gy	DA(t) _{feto}	0,1 Gy
DA _{tecido}	25 Gy a 0,5 cm	DA(t) _{tireoide}	2 Gy
DA _{pele}	10 Gy a 100 cm ²	DA(t) _{pulmão}	30 Gy
		DA(t) _{cólon}	20 Gy

Fonte: Modificado de CNEN, 2024.

Tabela 3 – Limites de dose para reduzir os riscos de efeitos estocásticos propostos pela IAEA.

Doses	Limiares nos primeiros 7 dias	Limiares em 1 mês	Limiares no 1º ano
Dose Equivalente _{tireoide}	50 mSv	—	—
Dose Efetiva	100 mSv	100 mSv	100 mSv
Dose Equivalente _{feto}	100 mSv	100 mSv	100 mSv

Fonte: Modificado de CNEN, 2024.

3.3. Desastres Nucleares

3.3.1. Testes e Ataques Nucleares

Na segunda-feira, 16 de julho de 1945, às 5h29 da manhã, ocorreu um dos acontecimentos mais emblemáticos da Segunda Guerra Mundial: o teste Trinity, considerado a primeira explosão nuclear da história. Esse evento inaugurou uma nova era no cenário bélico, abrindo caminho para os bombardeios atômicos de Hiroshima e Nagasaki, menos de um mês depois. O teste contou com a participação do físico teórico norte-americano Robert Oppenheimer e marcou o início de uma sequência de mais de dois mil experimentos nucleares conduzidos mundialmente até 1996 (NatGeo, 2025). No caso específico do Trinity, o

dispositivo utilizado, denominado “Gadget”, possuía formato semelhante ao de um balão, com aproximadamente um metro e meio de largura. Seu núcleo era constituído por uma esfera de plutônio de seis quilos caracterizada por alta radioatividade e relativa instabilidade, resultante da transformação do urânio em reatores nucleares. Essa estrutura interna encontrava-se envolvida por cerca de 2.200 quilos de explosivos convencionais (NatGeo, 2025).

Um ataque nuclear caracteriza-se pela consumação do emprego de um dispositivo destinado a produzir uma explosão nuclear. Essa explosão ocorre por meio de uma reação em cadeia descontrolada de fissão nuclear, que libera intensas quantidades de calor, luz, pressão atmosférica e radiação, acompanhadas pela formação de partículas radioativas. Quando o evento ocorre ao nível do solo, essas partículas são absorvidas pela típica “nuvem de cogumelo”, misturando-se a poeira e detritos, o que gera uma precipitação radioativa (fallout) capaz de afetar populações situadas a grandes distâncias do local da detonação (EUA, 2022).

3.3.1.1. Hiroshima e Nagasaki (1945)

Às 8h15 do dia 6 de agosto de 1945, os Estados Unidos da América (EUA) lançaram uma bomba atômica sobre a cidade de Hiroshima. O artefato, de codinome Little Boy, tinha como elemento fissil o urânio-235, totalizando 64 quilos (Okuno, 2015). O pulso térmico de três segundos provocado pela explosão queimou a pele de pessoas que estavam a até 3,5 quilômetros do marco zero (ponto diretamente abaixo da detonação) e deu início a incêndios em diferentes áreas da cidade. A onda de choque, por sua vez, destruiu grande parte das edificações, restando apenas estruturas de concreto ou aço (Rogers, 2024). Contudo, como o Japão não se rendeu após o ataque inicial, os EUA lançaram uma segunda bomba atômica três dias depois, desta vez sobre a cidade de Nagasaki. O artefato, de codinome Fat Man, utilizava o plutônio-239 como elemento fissil, sendo uma tentativa de demonstrar que a explosão em Hiroshima não havia sido um evento isolado (Rogers, 2024; Okuno, 2015).

Estima-se que o número de vítimas fatais nas duas cidades tenha ultrapassado 210 mil até o final de 1945 (Serrano, 2025), tendo a radiação ionizante papel central na mortalidade devido a liberação de raios gama e nêutrons pela explosão associada à exposição por isótopos como o ^{137}Cs e o iodo-131 (^{131}I). Em Hiroshima, vinte minutos após a explosão, iniciou-se a chamada “chuva negra”, que durou até 12h45 e contaminou uma área ovalada de 11 km por 19 km (Okuno, 2015).

As mortes por radiação imediata começaram na primeira semana e tiveram seu pico entre a terceira e a quarta semana após as explosões. Além disso, entre 1950 e 1990,

calcula-se que 850 pessoas que estavam próximas aos bombardeios tenham morrido em decorrência de câncer radioinduzido, e entre 400 e 800 tenham falecido por outras lesões não cancerígenas induzidas pela radiação (Rogers, 2024).

3.3.1.2. Ilhas Marshall (1954)

Após o término da Segunda Guerra Mundial, os EUA estabeleceram os Campos de Prova do Pacífico com o objetivo de realizar testes nucleares. Entre as décadas de 40 e 50, foram conduzidos 65 testes de armas nucleares, nos Atóis de Bikini e Enewetak, situados na extremidade noroeste do arquipélago das Ilhas Marshall (Simon *et al.*, 2010).

Os detritos radioativos resultantes das detonações eram dispersos na atmosfera e, em geral, transportados pelos ventos predominantes de leste em direção ao oceano aberto, a oeste das Ilhas Marshall. Todavia, relatos históricos apontam que, em diversos testes, a dispersão radioativa atingiu também direções. Nesses episódios, radionuclídeos como o ^{131}I se depositaram no solo por meio do fallout, configurando a principal fonte de exposição da população marshallesa (Simon *et al.*, 2010).

Ainda que as populações de Bikini e Enewetak tenham sido previamente realocadas, os habitantes de outros atóis permaneceram expostos até a detonação do chamado “teste Bravo”. Devido à precipitação radioativa inesperada que atingiu os atóis a leste, comunidades como as de Rongelap e Rongerik precisaram ser evacuadas, visto que tal medida visava interromper a exposição contínua à radiação, permitir procedimentos de descontaminação e garantir cuidados médicos imediatos relacionados às condições de exposição aguda (Cronkite *et al.* 1997 *apud* Simon *et al.*, 2010).

3.3.2. Acidente e Envenenamento Radiológico

3.3.2.1. Goiânia (1987)

Um acidente radiológico é caracterizado pela dispersão ou manuseio inadequado de fontes radioativas não associadas diretamente a reatores nucleares, geralmente, tais acidentes decorrem do descarte incorreto ou da utilização indevida de fontes radioativas, como em equipamentos médicos (IAEA, 1988). De acordo com a IAEA (1988), “o acidente de Goiânia foi um dos mais graves acidentes radiológicos já registrados”.

Em 13 de setembro de 1987, catadores encontraram em Goiânia, Goiás, um aparelho de radioterapia abandonado no Instituto Goiano de Radioterapia, que se encontrava desativado. No dia 18, o equipamento foi vendido a Devair Ferreira, proprietário de um

ferro-velho, que enquanto desmontava-o, evidenciou uma cápsula contendo um pó que brilhava em azul no escuro: o ^{137}Cs (Schumann; Berwig, 2019). Esse radionuclídeo, inexistente na natureza, é um subproduto do urânio, altamente tóxico e radioativo, emissor de radiação gama. Seu uso principal está relacionado a aparelhos de radioterapia, podendo também ser aplicado em células fotovoltaicas e no tratamento de neoplasias (Schumann; Berwig, 2019).

Seis dias após a descoberta, Ivo Ferreira, irmão de Devair, levou fragmentos do ^{137}Cs para sua residência e, a partir desse momento, iniciou-se a distribuição do material entre familiares e vizinhos. O episódio mais marcante ocorreu na casa de Ivo, onde o pó foi espalhado sobre uma mesa e sua filha de apenas seis anos, entrou em contato direto com o material e ingeriu os fragmentos (Schumann; Berwig, 2019).

Inicialmente, as pessoas expostas apresentaram sintomas como náusea, vômito, diarreia, tontura e queimaduras na pele. No entanto, devido ao desconhecimento da fonte de exposição, esses sinais não foram imediatamente relacionados à radiação, o que dificultou o diagnóstico. Apenas quando uma das vítimas levou a cápsula à Vigilância Sanitária de Goiânia foi possível identificar a origem do acidente, desencadeando as medidas de contenção (IAEA, 1988).

Ao todo, 112.800 pessoas foram monitoradas, das quais 249 apresentaram contaminação significativa, interna e/ou externa. Oito desenvolveram a SAR, 14 sofreram falência da medula óssea e uma pessoa precisou amputar o antebraço. Quatro indivíduos faleceram entre quatro e cinco semanas após a exposição, em decorrência de complicações típicas da SAR: duas por hemorragia e duas por infecção generalizada. Para evitar a contaminação ambiental, os corpos foram sepultados em caixões de fibra de vidro revestidos com chumbo (Schumann; Berwig, 2019).

Os levantamentos iniciais foram realizados a pé nas áreas contaminadas, identificando sete focos principais, alguns com níveis de dose de até 2 Sv/h a um metro de distância. Posteriormente, um levantamento aéreo com helicóptero monitorou mais de 67 km² da área urbana de Goiânia, confirmando os focos conhecidos e identificando uma área adicional com taxa de dose de 21 mSv/h. No total, 85 residências apresentaram contaminação relevante, resultando na evacuação de 200 pessoas em 41 delas (IAEA, 1988).

3.3.2.1. Caso Alexander Litvinenko (2006)

Alexander Litvinenko era um ex-agente da Comitê de Segurança do Estado da União Soviética (KGB) e integrante da unidade de elite de combate ao crime organizado do Serviço

Federal de Segurança Russo, o qual foi recrutado para investigar casos de corrupção política antes de desertar para Londres (McFee; Leikin, 2009). De acordo com o depoimento oficial (Owen, 2016) de sua esposa, Marina Litvinenko, o ex-agente era um homem saudável, não fumava, não consumia bebidas alcoólicas e mantinha uma rotina regular de exercícios físicos. No entanto, durante a noite de 1º de novembro de 2006, apresentou um quadro súbito de mal-estar, sendo internado alguns dias depois no Hospital Barnet, localizado em Londres. Após duas semanas, foi transferido para o University College Hospital (UCH), onde seu estado clínico se agravou progressivamente, culminando em seu falecimento em 23 de novembro do mesmo ano (Owen, 2016).

Conforme relata Nathwani *et al.* (2016 *apud* Harrison *et al.*, 2017), Litvinenko morreu em decorrência da ingestão de uma dose estimada em aproximadamente 4 GBq de ^{210}Po . A partir dessa descoberta, foi conduzido um amplo levantamento de contaminação nos principais locais de Londres, acompanhado de um extenso programa de monitoramento de pessoas potencialmente expostas (Bailey *et al.*, 2008, 2010; Maguire *et al.*, 2010; Shaw *et al.*, 2010 *apud* Harrison *et al.*, 2017).

De acordo com Harding (2016), foi constatado que Alexander foi vítima de assassinato por envenenamento quando o ex-agente russo ingeriu uma xícara de chá contaminada com ^{210}Po , em um hotel de Londres, durante um encontro com dois colegas. As análises forenses realizadas revelaram níveis extremamente elevados de radioatividade: o bule de cerâmica utilizado por Litvinenko apresentou leituras de até 100.000 bq, com a maior concentração detectada no bico. O objeto chegou a ser lavado e reutilizado inadvertidamente, aumentando o risco de exposição a outros clientes. A mesa em que se encontravam registrou 20.000 bq, em que metade desse valor seria suficiente para provocar a morte de uma pessoa (Harding, 2016).

O levantamento mostrou ainda que o ^{210}Po havia se dispersado amplamente pelo ambiente do hotel, sendo detectado em diversos objetos e superfícies, como a máquina de lavar louça, o chão, o caixa, utensílios de bar e até mesmo o banco do piano. As cadeiras ocupadas pelos três homens apresentavam altos níveis de radiação α , evidenciando a extensão da contaminação (Harding, 2016). Além disso, vestígios do radionuclídeo foram encontrados em um restaurante e bar de Londres frequentados por Litvinenko e até mesmo em aeronaves da British Airways. Apesar da amplitude da contaminação, nenhum dos 1700 passageiros nem dos 250 clientes testados apresentou sintomas ou sinais de contaminação. Entretanto, outros dois ex-agentes russos, um da KGB e outro do exército, testaram positivo para ^{210}Po em

Moscou, o que sugere o uso de uma quantidade substancial do material radioativo para causar tamanha dispersão (McFee; Leikin, 2009).

3.3.3. *Acidente Nuclear*

Diferentemente do acidente radiológico, o acidente nuclear é definido como um evento que ocorre em reatores nucleares, geralmente em decorrência de falhas humanas ou de desastres naturais, cujo resultado é a liberação de RIs (Ferro, 2014).

3.3.3.1. *Three Mile Island (1979)*

O primeiro acidente registrado em uma usina nuclear ocorreu em Three Mile Island (TMI), nos EUA, em 28 de março de 1979. O episódio envolveu a Unidade 2 da instalação, que sofreu um derretimento parcial do núcleo (EUA, 2024).

A Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos (NRC), em conjunto com outras instituições como a Agência de Proteção Ambiental, o Departamento de Saúde e Serviços Humanos e o Departamento de Energia e o Estado da Pensilvânia, conduziu estudos detalhados sobre os impactos radiológicos do acidente. Além disso, grupos independentes também realizaram análises. Como resultado, estima-se que aproximadamente 2 milhões de pessoas residentes no entorno de TMI-2 tenham recebido uma dose média adicional de apenas 1 milirem acima da radiação de fundo natural. Para fins comparativos, uma radiografia de tórax corresponde a cerca de 6 milirems, enquanto a exposição anual à radiação de fundo na região varia de 100 a 125 milirems. A maior dose registrada no acidente, em indivíduos localizados nos limites da usina, foi inferior a 100 milirems acima da dose de fundo (EUA, 2024).

3.3.3.2. *Chernobyl (1986)*

A catástrofe de Chernobyl é considerada o acidente nuclear mais grave da história, tanto pelo elevado custo econômico quanto pelo número de vítimas envolvidas. A usina localizava-se próxima à cidade de Pripyat, então território da União Soviética, atualmente pertencente à Ucrânia. Essa cidade foi projetada para abrigar cerca de 50.000 habitantes, majoritariamente trabalhadores da usina e suas famílias, mas hoje integra a zona de exclusão que circunda a instalação nuclear (Dupuy, 2007 *apud* Lima *et al.*, 2020).

A usina de Chernobyl era composta por quatro reatores RBMK (Reator Canalizado de Alta Potência), construídos entre 1977 e 1983, enquanto as unidades 5 e 6 ainda se encontravam em construção à época do acidente, não tendo sido concluídas posteriormente

(Lima *et al.*, 2020). Os reatores RBMK utilizavam água leve como refrigerante e grafite como moderador, uma configuração que contribuiu para a instabilidade operacional do sistema (Oliveira, 1986).

O acidente ocorreu durante um teste programado no reator 4, que seria desligado em 25 de abril de 1986 para manutenção, pois o objetivo era verificar se o gerador teria capacidade para fornecer energia suficiente às bombas de refrigeração em caso de perda do suprimento externo de energia. Desse modo, para a execução do teste, a potência do reator foi reduzida a níveis extremamente baixos, próximos do limite mínimo de segurança (Oliveira, 1986) e, além disso, 204 das 211 barras de controle foram removidas, aumentando a instabilidade do núcleo. Na madrugada de 26 de abril, o fluxo de água ultrapassou os parâmetros de segurança, mas essa condição não foi refletida nos instrumentos de controle, impossibilitando a percepção do risco pelos operadores. Por conseguinte, a sequência experimental prosseguiu com o corte da energia das bombas, redução do fluxo de água e consequente aumento do vapor, elevando abruptamente a potência do reator (Castilho; Suguimoto, 2014 *apud* Lima *et al.*, 2020).

Cabe destacar que o funcionamento de uma usina nuclear baseia-se no processo de fissão nuclear, no qual o núcleo de um átomo se divide em dois ou mais núcleos menores, acompanhados da emissão de partículas como nêutrons, partículas α , β e radiação gama, composta por fótons. A fissão pode ser iniciada a partir do bombardeamento do núcleo por partículas como nêutrons ou prótons, fenômeno classificado como reação nuclear. Esse processo libera grande quantidade de calor e radiação, sendo o calor aproveitado para aquecer água, gerar vapor e movimentar turbinas que produzem eletricidade (EUA, 2018).

Nesse sentido, o descontrole da reação em cadeia da fissão nuclear dentro do reator da Usina de Chernobyl levou ao aumento da temperatura e à deformação do núcleo. Ao tentar conter a reação, a equipe responsável pelo teste foi ordenada a reinserir as barras de controle. Contudo, devido à presença de grafite em suas pontas, essas barras provocaram um aumento súbito de potência de 7% para 50% em apenas três segundos. Em virtude disso, a pressão do vapor cresceu rapidamente, causando uma explosão que destruiu a cobertura do reator e abriu um buraco no teto da usina. O incêndio resultante, que perdurou por 10 dias, liberou aproximadamente 500 toneladas de combustível, 700 toneladas de grafite e grande quantidade de gases radioativos, espalhando-os para regiões vizinhas (Lima *et al.*, 2020).

As equipes de combate a incêndio enfrentaram grandes dificuldades para controlar as chamas, sendo algumas de suas principais vítimas. Adicionalmente, o intenso nível de radiação, a impossibilidade do uso de água e produtos químicos, e a fusão do betume que

recobria partes do piso da usina dificultaram a locomoção e atrasaram as operações. Como alternativa, dias após o incidente optou-se pelo emprego de helicópteros militares que despejaram cerca de 5000 toneladas de areia, chumbo, argila e boro sobre o reator danificado. Paralelamente, foram abertas galerias subterrâneas para reforçar o confinamento do cório e evitar a contaminação dos lençóis freáticos por radionuclídeos de longa meia-vida, como o estrôncio-90, rutênio-106 e ^{137}Cs (Oliveira, 1986).

A nuvem radioativa formada pelo incêndio espalhou diversos radionuclídeos, com destaque para o ^{131}I e o ^{137}Cs , que atingiram grande parte da Europa, como Ucrânia, Belarus, Rússia e, em certa medida, Escandinávia (WNA, 2025). Enquanto o ^{131}I , de curta meia-vida (8 dias), desintegrou-se em poucas semanas, o ^{137}Cs , de meia-vida de 30 anos, permaneceu presente no solo e em alimentos por décadas, ainda sendo detectado em 2005 em algumas regiões europeias. Estima-se que mais de cinco milhões de pessoas tenham passado a viver em áreas consideradas contaminadas, sendo 116.000 evacuadas em 1986 e outras 220.000 realocadas posteriormente (IAEA, 2006).

As maiores doses de radiação foram recebidas por cerca de 1000 trabalhadores de emergência nos primeiros dias, variando entre 2 e 20 Gy, níveis fatais para parte deles. Trabalhadores de recuperação expostos nos anos seguintes receberam doses superiores a 500 mSv, com média de 100 mSv (**Tabela 4**). No caso das populações evacuadas em 1986, a dose efetiva média foi estimada em 33 mSv (**Tabela 4**), podendo alcançar algumas centenas de mSv. A ingestão de alimentos contaminados com iodo radioativo foi um fator determinante para as doses elevadas na tireoide, especialmente entre crianças, com registros de até 50 Gy em casos individuais. A distribuição de pastilhas de iodo estável em Pripyat foi fundamental para reduzir os impactos locais. Já a exposição crônica da população em geral ocorreu principalmente pela presença de ^{137}Cs no solo, nos alimentos e na água, resultando em doses acumuladas entre 10 e 30 mSv (**Tabela 4**) em grande parte das regiões afetadas, podendo chegar a 50 mSv (**Tabela 4**) ou mais em áreas de controle rigoroso (IAEA, 2006).

Tabela 4 – Relação entre categorias da população, o número de pessoas afetadas e a dose média recebida em mSV.

Categorias da População	Número	Dose Média (mSv)
Trabalhadores de recuperação	600.000	~100
Evacuados da zona altamente contaminada	116.000	33
Residentes das zonas de controle rigoroso	270.000	>50

Categorias da População	Número	Dose Média (mSv)
Residentes de outras áreas contaminadas	5.000.000	10 – 20

Fonte: Modificado de IAEA, 2006.

3.3.3.3. Fukushima (2011)

Em 11 de março de 2011, a usina nuclear de Fukushima-Daiichi (FDNPS) sofreu severos danos após o terremoto de magnitude 9,0 ocorrido no leste do Japão e o subsequente tsunami. A perda de energia elétrica, somada ao comprometimento dos sistemas de segurança, resultou em danos graves ao núcleo de três dos seis reatores nucleares, ocasionando uma liberação prolongada e significativa de material radioativo no ambiente, tornando-se, portanto, o maior acidente nuclear civil desde Chernobyl (UNSCEAR, 2014).

Como resposta emergencial, o governo japonês recomendou a evacuação imediata de aproximadamente 78.000 pessoas residentes em um raio de 20 km da usina, bem como o abrigo domiciliar de cerca de 62.000 indivíduos que viviam entre 20 e 30 km do local. Posteriormente, em abril de 2011, determinou-se ainda a evacuação de mais 10.000 habitantes situados a noroeste da instalação, área classificada como de evacuação deliberada devido aos altos níveis de radioatividade no solo. Tais medidas foram fundamentais para reduzir em até dez vezes a exposição que seria recebida pela população afetada (UNSCEAR, 2014).

As análises conduzidas apontaram que as liberações atmosféricas de ^{131}I e ^{137}Cs variaram, respectivamente, entre 100 e 500 PBq e entre 6 e 20 PBq. Grande parte das partículas liberadas foi transportada pelos ventos em direção ao Oceano Pacífico, enquanto quantidades adicionais foram descartadas diretamente no mar, equivalendo a aproximadamente 10% e 50% das liberações atmosféricas de ^{131}I e ^{137}Cs , respectivamente. As maiores doses estimadas para a população concentraram-se dentro da zona de 20 km de evacuação e na área de evacuação deliberada. Para adultos, a dose efetiva média recebida antes e durante a evacuação foi inferior a 10 mSv, chegando a valores cerca de duas vezes maiores para bebês de um ano de idade. As doses na tireoide foram estimadas em até 35 mGy para adultos e até 80 mGy para bebês, sendo metade dessa exposição proveniente da ingestão de alimentos contaminados. Em locais mais distantes, como a cidade de Fukushima, a média de exposição foi de aproximadamente 4 mSv no primeiro ano para adultos, enquanto as crianças receberam doses aproximadamente duas vezes maiores. Casos individuais de bebês podem ter ultrapassado 100 mGy na tireoide, especialmente entre aqueles que permaneceram por mais tempo em áreas de risco ou consumiram alimentos locais após o acidente (UNSCEAR, 2014).

Até outubro de 2012, cerca de 25.000 trabalhadores estiveram envolvidos em atividades de mitigação e recuperação em Fukushima. A dose efetiva média recebida pela força de trabalho nos primeiros 19 meses foi de cerca de 12 mSv, sendo que 35% dos trabalhadores ultrapassaram 10 mSv, e 0,7% receberam doses superiores a 100 mSv. Em adição, foi confirmado que 12 trabalhadores mais expostos absorveram doses entre 2 e 12 Gy na tireoide, principalmente devido à inalação de ^{131}I (UNSCEAR, 2014).

4 METODOLOGIA

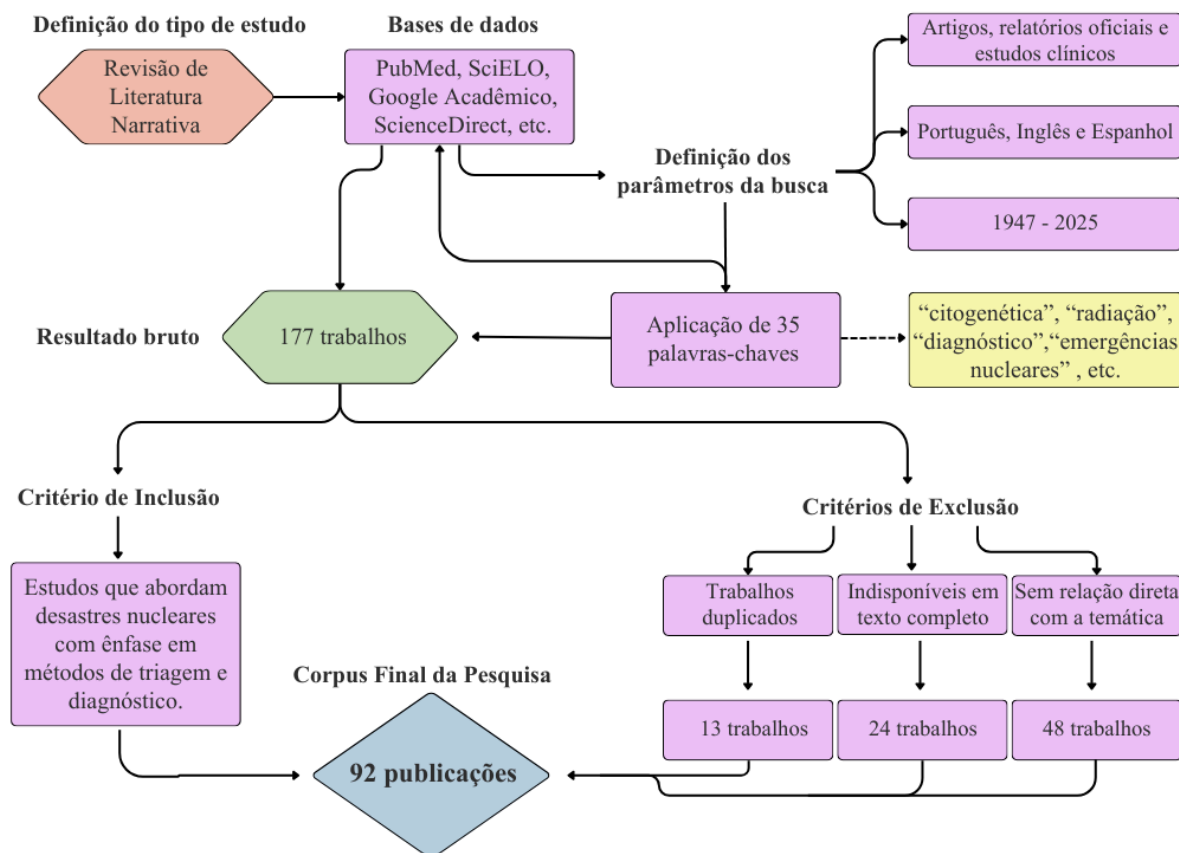
A metodologia adotada neste estudo consiste em uma revisão de literatura narrativa. Para a realização dessa revisão, foram consultadas plataformas eletrônicas de bases de dados acadêmicos, como ResearchGate, PubMed, Scientific Electronic Library Online, Google Acadêmico, ScienceDirect e Periódicos CAPES. A escolha de tais plataformas justifica-se pela abrangência e diversidade das publicações científicas que reúnem, o que possibilitou a obtenção de um acervo representativo acerca da temática investigada.

Em razão disso, foram selecionados artigos, relatórios oficiais e estudos clínicos, nos idiomas português, inglês e espanhol, publicados no intervalo temporal de 1947 a 2025, uma vez que esse período abrange tanto a ocorrência dos desastres nucleares analisados quanto os anos subsequentes, nos quais foram desenvolvidos e divulgados a maior parte dos estudos referentes a esses eventos e às suas consequências biológicas e clínicas. Desse modo, na busca nas bases de dados foram utilizadas palavras-chave relacionadas ao tema do estudo, bem como seus equivalentes em inglês, sendo elas: "citogenética", "investigação", "hematológico", "radiação", "Hiroshima", "Nagasaki", "Three Mile Island", "Chernobyl", "Ilhas Marshall", "Goiânia", "triagem", "diagnóstico", "exames laboratoriais", "técnica de FISH", "células sanguíneas", "protocolo médico", "síndrome aguda da radiação", "avaliação clínica", "dosimetria", "manifestações clínicas", "lesão por radiação", "emergências nucleares", "manejo médico", "hemograma", "radiação ionizante", "altas doses", "efeitos biológicos da radiação", "acidente nuclear", "acidente radiológico", "relatório", "ensaio de micronúcleos com bloqueio da citocinese", "urina", "fezes", "Alexander Litvinenko" e "cromossomos dicêntricos".

Os critérios de inclusão consideraram estudos que abordassem os desastres nucleares, com ênfase nos métodos de triagem e diagnóstico utilizados na época. Por conseguinte, foram excluídos trabalhos duplicados, indisponíveis em texto completo e sem relação direta com a temática.

O levantamento inicial resultou em um total de 177 trabalhos, dos quais 48 foram excluídos por não se enquadrarem no escopo da pesquisa, 13 por duplicidade e 24 por estarem indisponíveis no banco de dados (**Fluxograma 1**). Desse modo, a revisão foi composta por 92 publicações.

Fluxograma 1 – Síntese das etapas metodológicas do trabalho.



Fonte: O autor, 2025.

Por fim, com base em tal metodologia foi possível delimitar as principais ações de triagem e diagnóstico utilizadas em desastres nucleares e realizar demais análises complementares, o que possibilitou maior aprofundamento da discussão e sustentação metodológicas do estudo.

5 RESULTADOS

A partir da análise dos trabalhos selecionados, os resultados apresentados nesta revisão bibliográfica buscam evidenciar, sob uma perspectiva histórica e comparativa, as condutas laboratoriais e clínicas adotadas em diferentes desastres nucleares. Dessa forma, são abordados os principais procedimentos de triagem e diagnóstico empregados para a identificação dos efeitos biológicos da radiação ionizante, com ênfase nas manifestações clínicas, nos exames laboratoriais e nas técnicas de biodosimetria citogenética utilizadas em cada contexto. Além disso, a análise permite reconhecer as estratégias em comum aplicadas entre os distintos episódios, evidenciando a evolução das práticas diagnósticas ao longo do tempo e sua contribuição para o aprimoramento das respostas em emergências nucleares e de saúde pública.

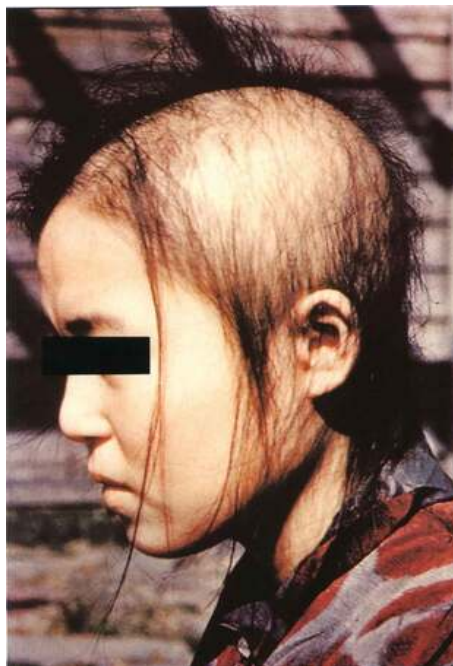
5.1. Triagem e Diagnóstico em Desastres Nucleares

5.1.1. *Hiroshima e Nagasaki*

Nos primeiros dias após os bombardeios atômicos, os médicos japoneses enfrentaram dificuldades em estabelecer diagnósticos precisos, pois desconheciam os riscos da radiação. Inicialmente, passaram a empregar os termos *genbaku-shou* (sintomas da bomba atômica) e *genshi-byou* (doença atômica) para designar um quadro clínico grave e pouco específico. No entanto, com a evolução das pesquisas médicas e patológicas realizadas por grupos acadêmicos, tornou-se possível reconhecer um padrão característico de manifestações clínicas e laboratoriais, o que permitiu consolidar a definição da Síndrome Aguda da Radiação como diagnóstico (Tomonaga, 2019).

Para o diagnóstico clínico da SAR foram considerados, em primeiro lugar, os sinais observados diretamente nos sobreviventes. Entre eles, destacou-se a queda de cabelo (**figura 7**), reconhecida como o sinal mais precoce e associado à gravidade do quadro. Outros sinais frequentes incluíram púrpura (manchas hemorrágicas na pele), sangramentos de mucosas (como cavidade oral, gengivas e trato intestinal) e diarreia com sangue. Além disso, a febre elevada (39 - 42 °C) foi um achado comum, inicialmente interpretado como infecção, mas posteriormente atribuída à falência da medula óssea induzida pela radiação, que levava à queda acentuada dos leucócitos (leucopenia) e, consequentemente, a infecções bacterianas graves (Tomonaga, 2019).

Figura 7 – Paciente com queda capilar após exposição excessiva de radiação proveniente da bomba atômica.

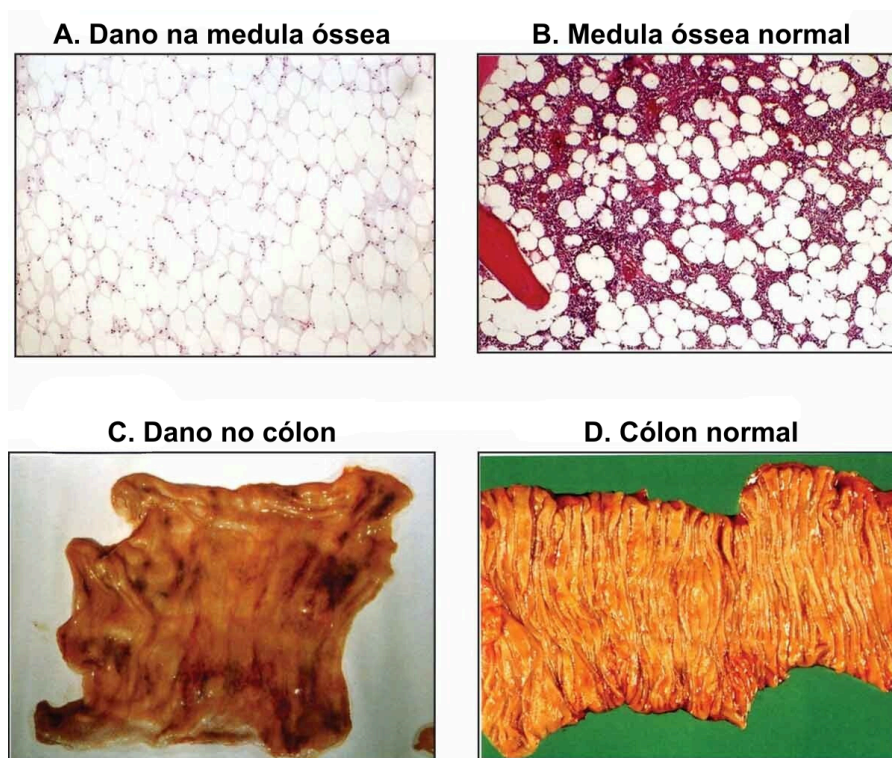


Fonte: Tomonaga, 2019.

Ainda como critério clínico para o diagnóstico, observou-se que indivíduos expostos a doses mais elevadas de radiação gama apresentaram febre e diarreia já no primeiro dia após a explosão. Entre sete e vinte e oito dias, surgiram manifestações típicas, como epilação, distúrbios gastrointestinais graves (com ênfase para diarreia intratável), púrpura, febre persistente, leucopenia e anemia. Essas manifestações eram frequentemente acompanhadas de complicações infecciosas e hemorrágicas, como laringite, faringite, gengivite, ulcerações necróticas em mucosas, petéquias, epistaxe, melena, metrorragia e hematúria. (Tomonaga, 2019; LeROY, 1947).

Os órgãos mais gravemente afetados pela exposição à radiação foram a medula óssea e o intestino, conforme ilustrado na figura 8. Observa-se que a medula óssea normal apresenta-se repleta de células hematopoiéticas (células coradas em magenta) (**Figura 8b**). Já a medula óssea irradiada é marcada pela destruição dessas células, sendo substituídas predominantemente por tecido adiposo e células claras (**Figura 8a**). De forma semelhante, o cólon normal apresenta múltiplas dobras características (**Figura 8d**), enquanto o cólon exposto à radiação encontra-se achatado e com evidências de sangramento (**Figura 8c**). Esses sinais clínicos, em conjunto, serviram como base para a caracterização diagnóstica da SAR (Tomonaga, 2019; LeROY, 1947).

Figura 8 – Achados patológicos de SAR em sobreviventes da bomba atômica.



Fonte: Modificado de Tomonaga, 2019.

Além da observação clínica, o diagnóstico foi sustentado por exames laboratoriais, em especial a análise hematológica. Os médicos constataram que a leucopenia era universal entre os sobreviventes irradiados, contudo quando as contagens de leucócitos eram inferiores a $600/\text{mm}^3$ foram associadas a mau prognóstico, indicando a gravidade da síndrome. Foram identificados também casos de trombocitopenia e achados patológicos caracterizados pela destruição das células hematopoiéticas da medula óssea e do baço, restando apenas o estroma de sustentação desses órgãos (LeROY, 1947).

Portanto, o diagnóstico da SAR em Hiroshima e Nagasaki foi fundamentado na associação entre sinais clínicos característicos, como queda de cabelo, púrpura, hemorragias, febre alta, diarreia intratável e infecções graves, e achados laboratoriais hematológicos, especialmente a leucopenia, a anemia progressiva e a destruição medular. Esses critérios, apesar das limitações da época, permitiram estabelecer a síndrome como uma entidade clínica específica nos sobreviventes da exposição (Tomonaga, 2019; LeROY, 1947).

5.1.2. Ilhas Marshall: Investigação de exposição interna

Após a explosão do teste nuclear Bravo, foi realizado um estudo para avaliar a exposição interna ao iodo radioativo (^{131}I) entre os moradores evacuados da Ilha Rongelap. O

método utilizado consistiu na coleta de urina 24 horas no 17º dia após a detonação, englobando 64 pessoas. Essas amostras foram enviadas ao Laboratório Científico de Los Alamos, onde foram analisadas para determinar a quantidade de ^{131}I excretada (Lessard *et al.*, 1985).

A análise indicou uma atividade média de 0,48 kBq de ^{131}I na urina de adultos, permitindo a estimativa indireta da quantidade acumulada na tireoide: 414 kBq. Para alcançar esse valor, os cientistas aplicaram modelos matemáticos de eliminação biológica baseados em cinética compartimental. Desse modo, esses modelos simulavam como o ^{131}I seria absorvido, distribuído e excretado no organismo humano, considerando tanto seu metabolismo estável quanto o decaimento radioativo (Lessard *et al.*, 1985).

Esse procedimento foi fundamental para compreender a dose interna absorvida pela tireoide dos indivíduos expostos. Os resultados forneceram dados que, posteriormente, foram utilizados pelo Laboratório Nacional de Brookhaven e outras instituições para reconstruir as doses de moradores de Rongelap, Ailinginae e Utrik. Todavia, passadas mais de cinco décadas, ainda não foram realizados estudos abrangentes que permitam mensurar o número total de doenças relacionadas à precipitação radioativa entre a população marshallense, nem há registros consistentes que possibilitem comparações internacionais confiáveis (Simon *et al.*, 2010).

5.1.3. Chernobyl

Após o acidente de Chernobyl, a resposta médica e científica foi marcada pela necessidade urgente de triagem, monitoramento e diagnóstico dos indivíduos expostos, especialmente os trabalhadores de emergência e a população das áreas mais contaminadas. O primeiro passo consistiu em avaliar as doses absorvidas, em particular na tireoide, devido à rápida incorporação do isótopo radioativo ^{131}I . Para tanto, empregaram-se medições externas de radiação gama realizadas por detectores posicionados contra o pescoço, o que permitiu a realização de aproximadamente 350 mil medições diretas da tireoide em Belarus, Ucrânia e Rússia nas primeiras semanas após o acidente (WHO, 2006). Essa medida inicial foi fundamental para identificar populações em risco e orientar intervenções médicas emergenciais.

Em relação aos trabalhadores de emergência, expostos a doses extremamente elevadas, o diagnóstico da SAR foi baseado em exames hematológicos e parâmetros citogenéticos obtidos de linfócitos sanguíneos (UNSCEAR, 2000 *apud* WHO, 2006). Em avaliações com outros trabalhadores, recorreram-se a estudos de tempo e movimento, que

relacionavam os pontos de exposição no local do acidente e a permanência dos trabalhadores, bem como à biodosimetria, que incluía técnicas como o FISH em linfócitos (Chumak *et al.*, 2005 *apud* WHO, 2006).

No caso da população das áreas mais contaminadas, a triagem médica imediata priorizou a identificação dos pacientes com maior risco de desenvolver a SAR, envolvendo cerca de 15 mil pessoas avaliadas em hospitais. Entre elas, aproximadamente 200 receberam doses iguais ou superiores a 1 Gy e apresentaram sintomas compatíveis com a doença (Vorobiev, 1993). Nesses pacientes, a biodosimetria citogenética, especialmente o ensaio de cromossomos dicêntricos (DCA) em linfócitos, foi considerado o método mais eficaz para quantificar a dose absorvida (Sevankaev; Zhloba, 1991 *apud* WHO, 2006). Estudos representativos realizados demonstraram níveis elevados de aberrações cromossômicas, consistentes com doses médias de até 250 mGy (WHO, 2006).

No âmbito da avaliação clínica, observou-se que a falência da medula óssea foi diretamente proporcional à intensidade da pancitopenia pós-irradiação, caracterizada por neutropenia grave e trombocitopenia profunda. As principais manifestações incluíam febre, infecções recorrentes e hemorragias, muitas vezes em forma de petéquias cutâneas e sangramentos de mucosas. Em casos mais severos, verificou-se a síndrome intestinal da radiação, associada a doses superiores a 10 Gy, que se manifestava com diarreia intensa em menos de uma semana após a exposição, configurando um quadro clínico de alta gravidade (Samoylov *et al.*, 2021).

O acompanhamento diagnóstico e laboratorial foi estruturado de forma sistemática, incluindo hemogramas seriados, exames bioquímicos, perfis imunológicos e avaliações hormonais da tireoide, além de exames de imagem e procedimentos invasivos quando necessários. Ademais, consultas especializadas multidisciplinares, abrangendo desde hematologistas até gastroenterologistas e pneumologistas, foram integradas ao processo de monitoramento (Belyi; Kovalenko; Bazyka, 2013).

Ainda em 1986 já se sugeria a possibilidade de superdiagnóstico da SAR. Logo, uma análise detalhada de documentos originais foi conduzida pelo Instituto de Biofísica de Moscou, com a participação de especialistas do Centro Nacional de Pesquisa em Medicina Radiológica da Ucrânia, entre 1986 e 1989. A fim de confirmar ou descartar o diagnóstico de SAR, os critérios utilizados baseavam-se na dinâmica típica dos índices hematológicos, sobretudo, granulócitos, neutrófilos e trombócitos durante a fase aguda subsequente à irradiação, em associação aos sintomas clínicos observados, conforme demonstrado no Anexo A (Belyi; Kovalenko; Bazyka, 2013). Por conseguinte, o diagnóstico de SAR foi cancelado

em 103 pacientes, não apenas em razão da inconsistência dos dados clínicos e laboratoriais, mas também pela ausência de informações médicas, que permitissem sua confirmação. Por conseguinte, o número de casos confirmados de SAR foi reduzido para 134 indivíduos, enquanto os demais foram classificados como expostos à radiação, mas sem desenvolvimento efetivo da síndrome (Belyi; Kovalenko; Bazyka, 2013).

Com relação à população geral em áreas contaminadas, os levantamentos citogenéticos foram iniciados mais tardiamente, aproximadamente cinco anos após o acidente, e revelaram resultados complexos. Em algumas análises em crianças, foi possível encontrar células caracterizadas por aberrações cromossômicas marcantes em poucas metáfases, mas cuja origem foi atribuída provavelmente a fatores virais, e não à exposição radiológica (Neel *et al.*, 1992 *apud* WHO, 2006). Progressivamente, o foco das análises passou da dosimetria dicêntrica para o uso do FISH, considerado mais preciso em exposições de baixa dose. Estudos realizados em populações reassentadas em Belarus e na Rússia indicaram doses médias variando entre 60 e 400 mGy, valores compatíveis com estimativas baseadas na deposição radioativa e nos cálculos de exposição ambiental (Salomaa *et al.*, 1997; Darroudi; Natarajan, 1996 *apud* WHO, 2006). Além disso, reavaliações de grupos previamente estudados, como evacuados de Pripjat, confirmaram a coerência entre diferentes métodos, reforçando a confiabilidade das estimativas de dose (Edwards *et al.*, 2002 *apud* WHO, 2006).

Além disso, o ensaio de micronúcleo com bloqueio de citocinese (CBMN) também foi utilizado para avaliar a exposição prolongada de indivíduos residentes nas proximidades de Chernobyl. Entre 1989 e 1991, oitenta pessoas localizadas entre 100 e 200 km da usina foram submetidas ao ensaio, juntamente com contagens corporais de ^{134}Cs e ^{137}Cs . Os resultados da análise de regressão múltipla demonstraram que as frequências de MN estavam significativamente associadas ao nível de atividade do radiocésio ($p = 0,004$). Além disso, verificou-se que a dose interna absorvida, estimada entre 0,6 e 9,2 mGy, apresentou correlação positiva e significativa com a frequência de MN ($R = 0,71$), reforçando a utilidade do método na avaliação de danos genéticos decorrentes de exposições crônicas a radionuclídeos (IAEA, 2011).

Em resumo, em Chernobyl a triagem e o diagnóstico das vítimas foram realizados por meio da combinação de dosimetria citogenética e física, associadas a exames laboratoriais e acompanhamento clínico.

5.1.4. Goiânia

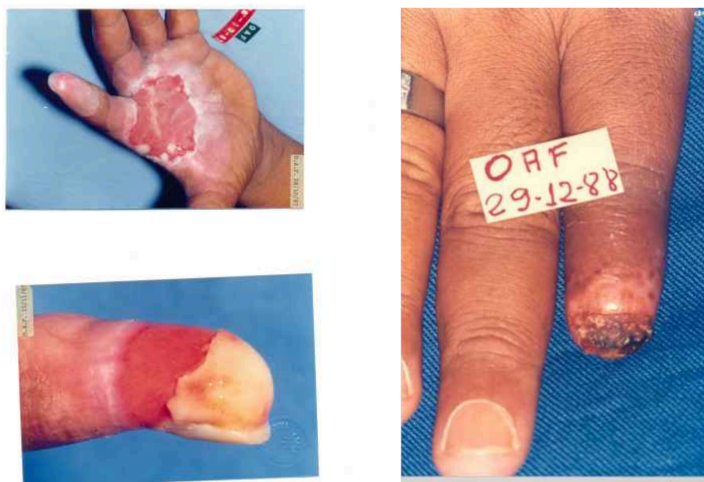
No acidente radiológico de Goiânia, a identificação dos primeiros casos de SAR ocorreu inicialmente a partir da observação clínica dos pacientes admitidos em hospitais locais. No dia 28 de setembro de 1987, onze indivíduos foram internados com suspeita inicial de intoxicação alimentar, dermatite de contato ou pênfigo. Porém, rapidamente se verificou que esses pacientes apresentavam um quadro mais complexo, caracterizado por sintomas inespecíficos, tais como náuseas, vômitos, diarreia, tontura e fadiga persistente, associados a lesões cutâneas de diferentes intensidades (IAEA, 1988).

A triagem e o diagnóstico foram estruturados a partir da chegada da equipe médica ao Hospital Geral de Goiânia. Composta por três médicos e técnicos de apoio, essa equipe estabeleceu protocolos de controle de exposição e contaminação baseados em levantamentos radiológicos e nas diretrizes do Relatório nº 65 da United States National Council on Radiation Protection and Measurements. Em virtude disso, os pacientes foram avaliados clinicamente, com registro de histórico médico, e considerados portadores da síndrome aguda da radiação, de LCIR e de contaminação interna e externa pelo radionuclídeo ^{137}Cs (IAEA, 1988).

O diagnóstico da SAR baseou-se, portanto, na integração entre a avaliação dos sinais clínicos apresentados e a aplicação de métodos laboratoriais e radiológicos de confirmação. O hemograma permitiu identificar a instalação da crise hematológica, característica da SAR, possibilitando prever a intensidade da depressão medular e a consequente suscetibilidade a infecções. Ademais, o registro detalhado da anamnese, associado à reconstrução do acidente, auxiliou na definição do período e da duração da exposição, informações essenciais para a estimativa da dose absorvida (IAEA, 1988).

A investigação das lesões cutâneas foi igualmente determinante para o diagnóstico. Durante a hospitalização, os pacientes apresentaram evolução típica de lesão radiológica: inicialmente, eritema, edema e descamação seca; posteriormente, formação de bolhas e ulcerações; e, em fases mais avançadas, necrose superficial seguida de reepitelização. Em cerca de três semanas após o acidente, dez pacientes desenvolveram lesões profundas, compatíveis com dano gama a tecidos mais internos, confirmando a gravidade da exposição (IAEA, 1988), como pode ser observado na figura 9.

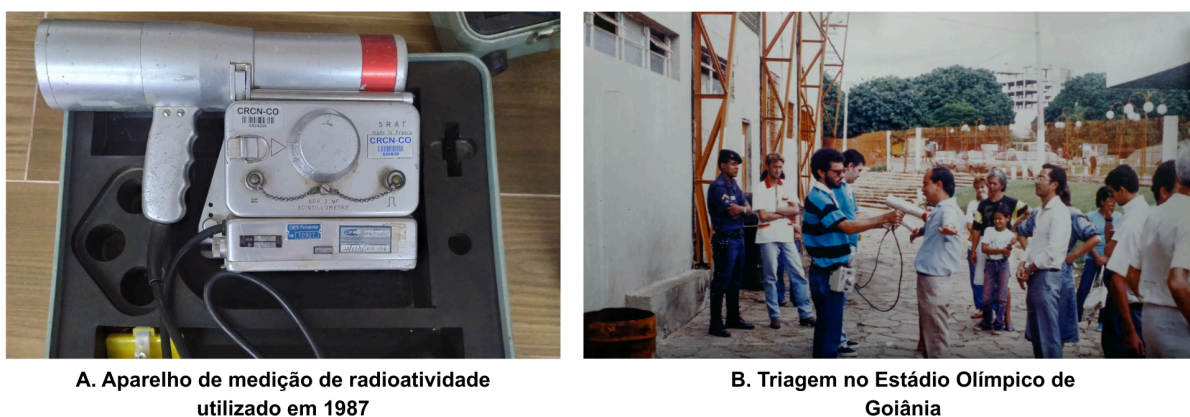
Figura 9 – LCIR observada em diferentes pacientes em 1987.



Fonte: Modificado de Brasil, 2024.

Além disso, os métodos de dosimetria desempenharam papel central na confirmação diagnóstica. A dosimetria interna foi realizada por meio de bioensaios de urina e fezes, confirmando a incorporação de ^{137}Cs e permitindo estimar o grau de contaminação interna. Já a dosimetria externa (**Figura 10**) baseou-se em medições radiológicas diretas, com taxas de dose registradas em até 15 mSv/h em algumas lesões cutâneas e de 3 mSv/h em contato com a pele de uma criança de seis anos e contadores de corpo inteiro (IAEA, 1988). Em relação a dosimetria citogenética, foram utilizados DCA, FISH e ensaio de micronúcleo.

Figura 10 – Dosimetria externa realizada na época do incidente.



A. Aparelho de medição de radioatividade utilizado em 1987

B. Triage no Estádio Olímpico de Goiânia

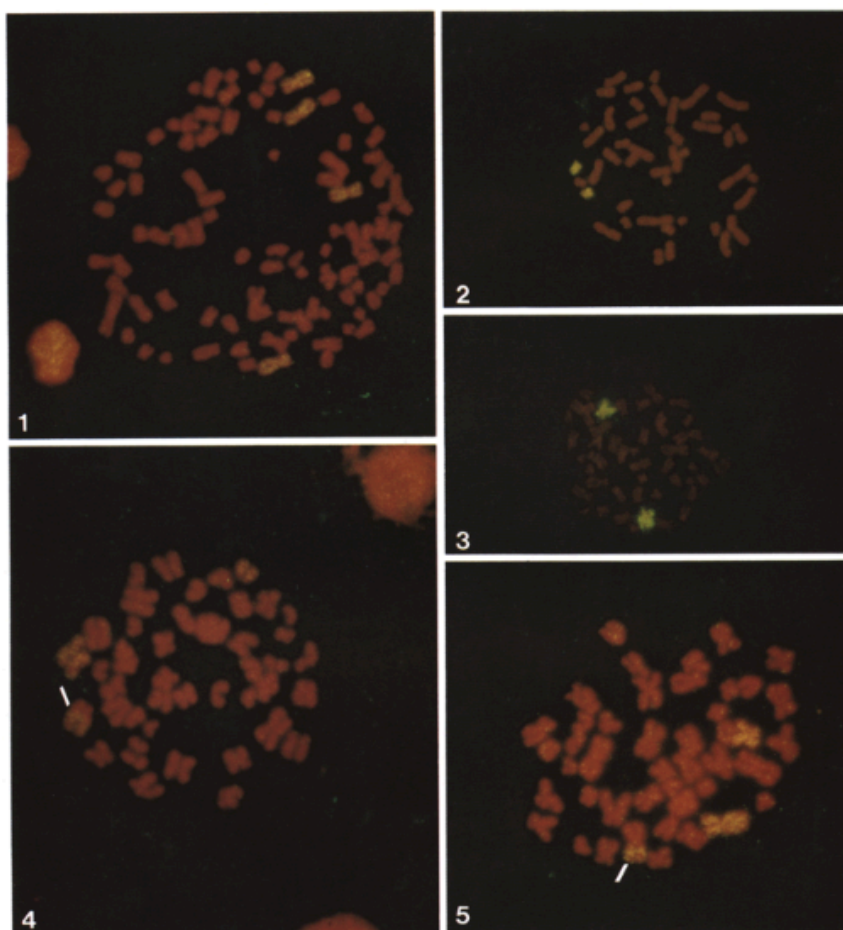
Fonte: Modificado de UOL, 2021.

A dosimetria citogenética conduzida a partir do DCA em linfócitos do sangue periférico foi realizada por um estudo de Ramalho, Nascimento e Natarajan (1988), no qual

foi constatado que em 97 indivíduos potencialmente expostos, verificou-se que 68 receberam doses inferiores a 0,5 Gy, enquanto 29 ultrapassaram esse valor; 21 indivíduos apresentaram doses acima de 1 Gy e 8 pessoas receberam doses superiores a 4 Gy, sem que nenhuma estimativa excedesse 7 Gy. A análise também revelou a complexidade do acidente, uma vez que a exposição foi fracionada, prolongada e envolveu tanto contaminação interna quanto externa, o que dificultou a interpretação das doses (Ramalho; Nascimento; Natarajan, 1988).

O FISH também foi utilizado subsequentemente como método dosimétrico a fim de realizar um estudo de acompanhamento citogenético das vítimas. Em razão disso, cromossomos individuais puderam ser facilmente discernidos (**Figura 11-1 a 11-3**), bem como suas translocações (**Figura 11-4 e 11-5**), sendo detectado 8,33% de células com deleções e 6,82% de células com translocações (Natarajan *et al.*, 1991).

Figura 11 – Imagens de cromossomos por microscopia de fluorescência.



Fonte: Natarajan *et al.*, 1991.

Por fim, a análise de micronúcleos foi realizada a partir de estudos conduzidos por Cruz *et al.* (1994). Dessa forma, amostras de sangue periférico foram coletadas um ano após o

evento, abrangendo um total de 276 doadores aleatórios. Entre os participantes, incluíam-se indivíduos com exposição direta à radiação, membros da equipe que atuavam nas áreas contaminadas e um grupo controle não exposto (Cruz *et al.*, 1994).

Os resultados obtidos evidenciaram que tanto a equipe exposta quanto os indivíduos com exposição direta apresentaram frequências de MN mais elevadas quando comparadas ao grupo controle não exposto (Cruz *et al.*, 1994).

Além disso, observou-se que a exposição à radiação ionizante resultou em alterações no padrão de covariância entre as variáveis canônicas. Nos indivíduos não expostos, o aumento na frequência de células com um único MN apresentou uma covariância negativa em relação à frequência de células com dois ou três MNs, indicando uma tendência inversa entre essas ocorrências. Em contrapartida, entre os indivíduos expostos, verificou-se uma covariância positiva, ou seja, o aumento na frequência de qualquer número de MNs esteve associado ao aumento nas frequências dos demais (Cruz *et al.*, 1994).

5.1.5. Three Mile Island: Investigação citogenética

No contexto do acidente nuclear de TMI foram conduzidos exames citogenéticos entre os anos de 1994 e 1995, com o objetivo de investigar possíveis efeitos da exposição à RI sobre a população residente nas proximidades da usina. Em virtude disso, o foco principal foi a identificação de aberrações cromossômicas instáveis e estáveis, que poderiam indicar danos decorrentes da radiação (Shevchenko; Snigiryova, 1999).

A escolha dos participantes levou em consideração não apenas a suspeita de exposição à radiação durante o acidente, reforçada pela manifestação de sinais clínicos agudos como eritema cutâneo, gosto metálico, irritação das mucosas, vertigem, vômitos e diarreia, mas também a ocorrência de doenças desenvolvidas posteriormente. Ademais, foram controlados fatores que poderiam interferir na análise, tais como histórico de irradiação diagnóstica e terapêutica (Shevchenko; Snigiryova, 1999).

Os exames citogenéticos foram realizados em dois períodos distintos, julho-agosto de 1994 e janeiro-fevereiro de 1995. Os resultados apontaram, de forma geral, níveis relativamente normais de aberrações cromossômicas, mas evidenciaram um aumento significativo na frequência de células contendo dicêntricos, chegando a ser dez vezes superior ao valor de controle. Essa alteração foi identificada em 20 indivíduos, correspondendo a 70% dos participantes. A taxa de células com dicêntricos variou entre 0,2% e 0,8%, valores que superaram o controle em até 40 vezes. Além disso, em um paciente foi registrado um tricêntrico, configurando um achado de maior complexidade (Shevchenko; Snigiryova, 1999).

Paralelamente, em seis indivíduos do grupo examinado foi avaliada a presença de translocações estáveis por meio da técnica de hibridização *in situ* fluorescente (FISH). Células com esse tipo de alteração foram detectadas em todos os participantes analisados, com níveis superiores aos do grupo controle. Em três deles, as diferenças apresentaram significância estatística. Portanto, a frequência de translocações observada excedeu em cinco vezes os valores de referência, demonstrando a utilidade do método FISH para complementar a análise tradicional de aberrações instáveis (Shevchenko; Snigiryova, 1999).

Os achados revelam que, passados cerca de 15 anos do acidente, o número de células com aberrações cromossômicas instáveis havia diminuído, provavelmente em razão de sua eliminação natural da circulação sanguínea. Em contrapartida, as aberrações estáveis, como as translocações, permaneceram detectáveis, permitindo a estimativa retrospectiva de dose absorvida. Com base nos resultados obtidos, estimou-se uma dose média entre 0,6 e 0,9, considerando a exposição prolongada ou crônica à radiação (Shevchenko; Snigiryova, 1999).

Dessa forma, o processo de triagem citogenética da população próxima a TMI demonstrou a ocorrência de alterações cromossômicas consistentes com exposição à RI. A combinação de métodos tradicionais e da técnica FISH permitiu confirmar tanto a presença de aberrações instáveis quanto de translocações estáveis, fornecendo subsídios para a caracterização dos efeitos biológicos do acidente (Shevchenko; Snigiryova, 1999).

5.1.6. Caso Alexander Litvinenko

O caso clínico de Alexander Litvinenko apresentou-se de forma abrupta e progressiva. De acordo com o depoimento de sua esposa, os primeiros sintomas surgiram na madrugada de 2 de novembro de 2006, quando Litvinenko começou a vomitar intensamente. Na manhã seguinte, ele aparentava exaustão extrema e continuava com episódios persistentes de vômito, que evoluíram, no dia seguinte, para dor abdominal e diarreia com sangue (Owen, 2016). Em virtude do agravamento do quadro, foi internado no hospital, apresentando sintomas gastrointestinais agudos, graves e de rápida progressão (McFee; Leikin, 2009).

Segundo Owen (2016), devido aos sintomas apresentados, o diagnóstico inicial estabelecido pela equipe médica foi de gastroenterite associada à desidratação leve. A fim de identificar a causa dos sintomas, nos dias subsequentes à sua internação foram realizados diversos exames laboratoriais. Os resultados iniciais do hemograma mostraram níveis elevados de hemoglobina e leucócitos, com contagem de plaquetas dentro da normalidade. Além disso, detectaram-se valores anormalmente altos de creatinina e ureia, compatíveis com desidratação resultante de vômitos e diarreia intensos (Owen, 2016).

Por volta de 9 de novembro, Marina Litvinenko manifestou ao médico responsável, Dr. Dean Creer, sua suspeita de que o marido poderia ter sido envenenado, em razão de seu histórico de saúde e de relações com pessoas potencialmente perigosas. Contudo, o profissional considerou a hipótese improvável, interpretando o quadro como resultado de uma infecção comum. Em 13 de novembro, o Dr. Virchis assumiu o caso e, ciente das preocupações anteriores, observou que a condição clínica do paciente não se encaixava no diagnóstico de gastroenterite, motivo pelo qual solicitou novas avaliações (Owen, 2016).

As manifestações clínicas observadas após as novas avaliações foram queda excessiva de cabelo (**Figura 12**) e pancitopenia, isto é, a redução generalizada das células sanguíneas, levantando suspeitas de toxicidade por tálio ou exposição à RI. Em virtude disso, novas amostras de sangue e urina foram submetidas à espectrometria gama, mas não se observaram anormalidades significativas (McFee; Leikin, 2009). Todavia, diante da persistência do quadro, o Dr. Virchis observou que o paciente se assemelhava a indivíduos submetidos a quimioterapia intensiva e irradiação corporal total antes de um transplante de medula óssea. Assim, solicitou que o setor de radiologia verificasse a possibilidade de contaminação por fontes radioativas, mas a medição com o contador Geiger, realizada em 15 de novembro, não indicou emissões radioativas (Owen, 2016).

Figura 12 – Alexander Litvinenko na UTI 3 dias antes de seu falecimento.



Fonte: Harding, 2016.

Em 16 de novembro, o Dr. Virchis discutiu o caso com o toxicologista Ivan House, que sugeriu tratar a condição como suspeita de envenenamento por tálio, uma vez que exames posteriores revelaram degeneração completa da medula óssea, sem elementos hematopoiéticos discerníveis, levando à consideração de um transplante como única

alternativa terapêutica. Com base nessa avaliação, Litvinenko foi transferido para o UCH em 17 de novembro (Owen, 2016).

No UCH, o Dr. Nathwani registrou que, em 21 de novembro, levantou-se novamente a hipótese de envenenamento por agentes radioativos ou quimioterápicos, sugerida por um farmacêutico do hospital e pela equipe de toxicologia. No mesmo dia, durante uma entrevista televisada, o Professor Henry afirmou publicamente acreditar que Litvinenko havia sido envenenado com tálio radioativo. Essa declaração levou o Superintendente Detetive Clive Timmons a solicitar o envio de amostras de sangue e urina do paciente para a Atomic Weapons Establishment (AWE), com o objetivo de verificar possível contaminação radioativa. As amostras chegaram à AWE na noite de 21 de novembro e foram submetidas a testes imediatos. Inicialmente, os resultados sugeriram presença de ^{210}Po , um isótopo emissor de partículas α , na urina, mas essa detecção foi erroneamente interpretada como uma possível anomalia causada pelo frasco de armazenamento (Owen, 2016).

Diante da incerteza, uma nova amostra foi enviada em 23 de novembro, confirmando definitivamente a contaminação por ^{210}Po (Owen, 2016). De acordo com Harrison *et al.* (2017), análises comparativas de urina revelaram que a quantidade ingerida por Litvinenko foi cerca de 10^{12} vezes superior aos níveis naturais de incorporação.

Após o falecimento de Alexander, o Dr. Cary analisou os registros médicos e destacou a presença de falência de medula óssea, falência de múltiplos órgãos e alopecia, confirmando o quadro clínico compatível com exposição aguda à radiação por ingestão de ^{210}Po . O especialista concluiu que a dose recebida excedeu em muito os limites conhecidos de sobrevivência e, com base na evolução clínica e nas estimativas de dose absorvida, diagnosticou como causa da morte a SAR. Por fim, o Dr. Cary indicou que o óbito resultou possivelmente de um episódio final de sepse associado à falência de órgãos múltiplos, distúrbios metabólicos e, potencialmente, efeitos diretos da radiação sobre o coração (Owen, 2016).

5.1.7. Fukushima

O terremoto e o tsunami que devastaram a costa nordeste do Japão, comprometeu gravemente a capacidade de monitoramento radiológico tanto no local quanto nas áreas externas à usina. A inundação provocada pelo tsunami inutilizou grande parte dos equipamentos essenciais, como os dosímetros eletrônicos pessoais, instrumentos de medição portáteis e monitores fixos de radiação. Como resultado, o registro das doses individuais foi severamente prejudicado, levando os socorristas a compartilhar dosímetros durante as

missões, com apenas um membro da equipe equipado com o dispositivo, enquanto os demais precisavam registrar manualmente as estimativas de dose. Essa limitação inicial dificultou o processo de triagem e atrasou a obtenção de dados mais precisos sobre a magnitude da exposição dos trabalhadores (UNSCEAR, 2014).

As primeiras avaliações de contaminação interna foram conduzidas por meio de medições *in vivo* em Onahama, a 55 km da usina, utilizando equipamentos de corpo inteiro relativamente simples, que apresentavam limitações, como a incapacidade de detectar radionuclídeos na tireoide e a influência de níveis ambientais de radiação mais elevados naquela região. Quando as doses estimadas ultrapassavam 20 mSv, os trabalhadores eram encaminhados para a Agência de Energia Atômica do Japão, onde passavam por avaliações adicionais. Nos casos em que a dose efetiva combinada de exposição externa e interna excedia o limite emergencial de 250 mSv, o monitoramento era realizado pelo Instituto Nacional de Ciências Radiológicas (NIRS), que conduzia análises mais detalhadas (UNSCEAR, 2014).

A triagem da população, por sua vez, enfrentou um desafio adicional devido à perda dos monitores específicos de tireoide, fundamentais para a detecção do iodo radioativo. Como medida alternativa, entre 26 e 30 de março de 2011 foi empregado um cintilador de NaI(Tl) para medir as taxas de dose ambiente em crianças de diferentes localidades da prefeitura de Fukushima. Com base nos parâmetros estabelecidos pelo Conselho de Segurança Nuclear, considerou-se que uma leitura de 0,2 mSv por hora equivalia a 100 mSv de dose tireoidiana em crianças de 1 ano de idade, valor definido como limiar de triagem. Utilizando esse método, foram avaliadas 1.080 crianças com menos de 15 anos, revelando doses abaixo do nível crítico de preocupação (Nagataki; Takamura, 2014). Em paralelo, estudos independentes confirmaram a presença de ^{131}I em evacuações realizadas em abril de 2011, quando Tokonami e colaboradores detectaram atividade tireoidiana em 39 dos 45 evacuados de áreas costeiras e em 7 dos 17 residentes do distrito de Tsushima, com doses equivalentes medianas de 4,2 mSv em crianças e 3,5 mSv em adultos (Tokonami *et al.*, 2013 *apud* Nagataki *et al.*, 2013).

Além do monitoramento tireoidiano, diversas iniciativas foram implementadas para avaliar a exposição interna e externa da população. Na cidade de Fukushima, por exemplo, 36.767 residentes receberam dosímetros entre setembro e novembro de 2011, período em que se observou que 87,2% apresentaram doses inferiores a 0,5 mSv e 99,7% inferiores a 1 mSv. Casos em que os valores ultrapassaram 2 mSv foram atribuídos a falhas no uso dos crachás, como deixá-los em ambientes externos ou submetê-los a inspeções de raio-X (Nagataki *et al.*, 2013). Outras pesquisas, realizadas em Minamisoma e na Universidade de Nagasaki, utilizaram contadores de corpo inteiro e confirmaram que as doses comprometidas eram

baixas na grande maioria dos indivíduos, com muitas amostras abaixo até mesmo do limite de detecção. Um levantamento envolvendo mais de 32 mil pessoas, conduzido entre 2011 e 2012, mostrou que todas as crianças avaliadas apresentaram níveis de ^{137}Cs abaixo de 300 Bq/corpo, o que reforça a baixa exposição interna da população (Nagataki *et al.*, 2013).

Como brevemente mencionado, o NIRS, por ser um centro nacional de referência para a preparação médica de emergências radiológicas no Japão, foi o responsável por receber todos os indivíduos com suspeita de superexposição à RI após o acidente de Fukushima. Entre 21 de março e 1º de julho de 2011, foram coletadas amostras de sangue de 12 trabalhadores envolvidos nas atividades de restauração, com o objetivo de realizar o DCA, conforme os protocolos estabelecidos pela IAEA e pela Organização Internacional de Normalização (Suto, 2016).

Após um período de 48 horas de cultura dos linfócitos do sangue periférico, mais de mil imagens de metáfase foram capturadas para a contagem de DIC, utilizando dois conjuntos de sistemas automatizados de imagem citogenética. Para garantir a confiabilidade dos resultados, 14 indivíduos saudáveis, pareados por idade e sem exposição ocupacional prévia à radiação, foram incluídos como grupo controle (Suto, 2016).

Os resultados do DCA, conforme apresentado por Suto (2013), na tabela 5, indicaram que nenhum dos trabalhadores avaliados apresentou valores que ultrapassassem o limite de dose de 250 mGy. Quando considerado o limite de confiança superior de 95% das estimativas de dose, os valores permaneceram abaixo de 300 mGy, cujo limite é considerado inferior para a triagem médica da SAR. Assim, os achados corroboram a ausência de manifestações clínicas compatíveis com a SAR entre os indivíduos avaliados. Além disso, observou-se uma boa concordância entre as doses biológicas estimadas pelo DCA e aquelas registradas pelos dosímetros pessoais com alarme (APDs), reforçando a precisão e a confiabilidade do método citogenético empregado (Suto, 2016).

Tabela 5 – Resultados da biodosimetria dos trabalhadores por DCA.

ID	Registro do APD (mSv)	Nº de metáfases analisadas	Contagens de dicêntricos equivalentes	DIC por metáfase	Dose estimada pelo DCA
Fu-3	179	1,003	7	0.00698	170
Fu-4	180	1,000	7	0.00700	171
Fu-5	173	1,000	5	0.00500	129
Fu-6	87	1,036	1	0.00097	26

ID	Registro do APD (mSv)	Nº de metáfases analisadas	Contagens de dicêntricos equivalentes	DIC por metáfase	Dose estimada pelo DCA
Fu-7	38	1,005	4	0.00398	105
Fu-8	102	1,013	4	0.00395	105
Fu-9	—	1,035	6	0.00580	146
Fu-10	17	1,037	3	0.00289	79
Fu-11	4	1,042	1	0.00096	26
Fu-12	—	1,004	2	0.00199	55

Fonte: Modificado de Suto, 2013.

Em síntese, embora o acidente de Fukushima tenha imposto sérias dificuldades para o processo de triagem inicial, especialmente devido à perda de equipamentos fundamentais e à necessidade de improvisação em condições adversas, as análises posteriores demonstraram que a maioria dos trabalhadores e residentes esteve exposta a doses relativamente baixas de radiação. Diferentemente do que ocorreu em acidentes anteriores, como Chernobyl e Goiânia, não houve registros de SAR, sendo os principais impactos sobre a população relacionados a fatores decorrentes da evacuação em massa e do trauma do desastre natural (UNSCEAR, 2014).

5.2. Abordagens Diagnósticas Comuns aos Desastres Nucleares

A partir do levantamento realizado, observa-se que diversos desastres nucleares compartilharam métodos semelhantes de diagnóstico (**Quadro 1**). Entre os principais métodos empregados, destaca-se a biodosimetria citogenética, por meio da análise de aberrações cromossômicas, especialmente nos eventos de TMI, Chernobyl, Goiânia e Fukushima, com a aplicação de técnicas como FISH, DCA e CBMN (Shevchenko; Snigiryova, 1999; IAEA, 2011; Suto, 2016). Outro recurso foi o diagnóstico clínico da SAR, baseado na observação de sintomas característicos como náuseas, vômitos, febre, diarreia sanguinolenta, alopecia, lesões cutâneas e sangramento nas mucosas, sendo este método essencial nos casos mais graves, como os de Hiroshima e Nagasaki, Chernobyl, Goiânia e no caso Litvinenko (IAEA, 1988; Owen, 2016; Tomonaga, 2019; Samoylov *et al.* 2021). Paralelamente, os exames hematológicos realizados destacaram a leucopenia, frequentemente acompanhada de trombocitopenia como padrões clínicos associados à exposição a RI, conforme observado em Hiroshima, Chernobyl, Goiânia e no caso Litvinenko (IAEA, 1988; Owen, 2016; Tomonaga,

2019; Samoylov *et al.* 2021). Por fim, os métodos de dosimetria interna e externa também desempenharam papel relevante, com a aplicação de bioensaios de urina e fezes, dosimetria da tireoide, cintiladores e contadores de corpo inteiro em diferentes contextos (Lessard *et al.*, 1985; IAEA, 1988; WHO, 2006; Nagataki; Takamura, 2014; Owen, 2016).

Os métodos específicos de triagem e diagnóstico identificados em cada um dos desastres estão sintetizados no quadro 1.

Quadro 1 – Métodos de triagem e diagnóstico observados em desastres nucleares.

Técnica/Método de diagnóstico	Utilizado em	Observações
Biodosimetria Citogenética	Three Mile Island, Chernobyl, Goiânia e Fukushima	TMI: FISH e DCA; Chernobyl: FISH, DCA e CBMN; Goiânia: FISH, DCA e CBMN; Fukushima: DCA.
Diagnóstico clínico da SAR	Hiroshima/Nagasaki, Chernobyl, Goiânia e Caso Litvinenko	Sintomas comuns: Náuseas, vômitos, febre, diarreia sanguinolenta, queda de cabelo, lesões de pele e sangramento das mucosas.
Hemograma	Hiroshima/Nagasaki, Chernobyl, Goiânia e Caso Litvinenko	Principal sinal clínico observado: Leucopenia e trombocitopenia.
Dosimetria Interna e Externa	Ilhas Marshall, Chernobyl, Goiânia, Caso Litvinenko e Fukushima	Ilhas Marshall: Bioensaio de urina; Chernobyl: Medição direta da tireoide; Goiânia: Bioensaio de urina e fezes, dosímetro físico e contadores de corpo inteiro; Caso Litvinenko: Bioensaio de urina; Fukushima: Cintilador de NaI(Tl), dosímetros individuais e contadores de corpo inteiro.

Fonte: O autor, 2025.

Diante do conjunto de dados apresentados, observa-se que os diferentes desastres nucleares ao longo da história compartilharam metodologias complementares de triagem e diagnóstico. Ademais, cada evento apresentou particularidades quanto à escolha dos métodos, determinadas pela natureza da exposição, disponibilidade tecnológica e urgência da resposta. Assim, a análise comparativa destes procedimentos permite compreender como tais abordagens se consolidam nos processos de triagem e diagnóstico de vítimas de desastres nucleares, constituindo o ponto de partida para a discussão a seguir.

6 DISCUSSÃO

Inicialmente, é fundamental realizar medições com monitores de radiação, como dosímetros TLD e OSLD (Lalic, 2019), de modo a identificar a possibilidade de contaminação externa ou interna e, assim, direcionar os procedimentos subsequentes (WHO, 2006). Entretanto, apenas o conhecimento de métodos de detecção e a utilização da dosimetria física não são suficientes como medidas de contenção, como evidenciado no caso de Fukushima, em que, devido aos desastres naturais, boa parte dos medidores de radiação foi perdida (Gnanasekaran, 2021). Por conseguinte, é essencial saber identificar os sinais clínicos da contaminação por RI (IAEA, 2020).

Nesse momento, a triagem médica assume um papel central, uma vez que possibilita a identificação de indivíduos que apresentam manifestações clínicas iniciais, como náusea, vômito e diarreia, as quais podem indicar a necessidade de cuidados médicos emergenciais. O hemograma, por exemplo, constitui uma ferramenta de triagem crucial, a qual permite reconhecer mais rapidamente aqueles indivíduos potencialmente mais expostos a RI (IAEA, 2020). Ademais, a avaliação médica inicial tem como finalidade a classificação dos indivíduos em diferentes categorias de necessidade de atenção à saúde, permitindo identificar pacientes de alto risco. Consequentemente, nesses casos, a conduta deve incluir a aplicação de testes diagnósticos específicos, como exames citogenéticos, visto que permitem avaliar, com maior precisão, a magnitude da contaminação radioativa (WHO, 2006).

6.1. Triagem e Diagnóstico

Segundo o relatório publicado pela IAEA (2020), cujo título traduzido é “Gestão Médica de Lesões por Radiação”, a triagem é o processo que classifica os pacientes em categorias a partir de suas lesões e/ou doenças, a qual constitui uma etapa essencial no manejo clínico em situações de exposição à RI, tendo como finalidade otimizar os serviços disponíveis e agilizar o atendimento médico. Uma de suas funções centrais é determinar o nível de urgência do atendimento, considerando as condições clínicas gerais do indivíduo e possíveis lesões convencionais associadas (IAEA, 2020).

Além disso, o conceito de “hora de ouro”, discutido por Goans e Waselenko (2005 *apud* Li, 2010) é amplamente reconhecido como o intervalo crítico em que a triagem imediata das vítimas permite o encaminhamento rápido para o tratamento definitivo, aumentando significativamente as chances de sobrevivência. Desse modo, dispor de informações precisas acerca do nível de contaminação interna torna-se essencial para fundamentar a decisão sobre a

necessidade de intervenção médica (Laroche *et al.*, 2007 *apud* LI, 2010). Nessas circunstâncias, a decisão pela hospitalização deve considerar tanto os sinais clínicos iniciais, quanto a condição geral do paciente, a dose estimada e os resultados de exames complementares. Em casos de exposição de corpo inteiro ou localizada, a observação atenta dos sintomas clínicos precoces é determinante para a definição da conduta médica. Alternativamente, pode-se recorrer ao monitoramento das primeiras manifestações cutâneas, associado à análise laboratorial do sangue periférico nas primeiras 48 horas, por meio de hemograma como ferramenta auxiliar na avaliação da dose recebida (IAEA, 2020).

Em razão disso, as manifestações prodrômicas desempenham papel relevante na triagem, pois permitem a classificação de indivíduos expostos de acordo com a gravidade clínica, direcionando-os ao tipo de cuidado mais adequado. Sintomas como náuseas, vômitos, diarreia e eritema de pele e mucosas surgem em intervalos que variam de algumas horas a poucos dias, a depender das características da irradiação, e constituem parâmetros iniciais para avaliação da severidade da exposição (IAEA, 2020).

Para além da sintomatologia imediata, uma triagem satisfatória exige a integração entre achados clínicos e laboratoriais. A IAEA (2020) recomenda a análise associada de manifestações clínicas, tempo de aparecimento e valores limiares de dose necessários ao desencadeamento dos sintomas. Ressalta-se, no entanto, que fatores individuais, como a radiosensibilidade e predisposições genéticas, podem modificar o limiar de resposta e devem ser levados em conta na interpretação dos resultados, o que reforça a importância de profissionais treinados (IAEA, 2020).

Deve-se destacar ainda que a identificação de uma LCIR, por exemplo, pode ser feita tanto pela confirmação da proximidade de um indivíduo em relação a uma fonte radioativa conhecida, quanto por meio de sintomas clínicos e achados laboratoriais inexplicáveis. Casos assim podem envolver trabalhadores diretamente expostos, indivíduos em contato acidental com materiais radioativos, ou até transeuntes em áreas próximas a acidentes. Diante disso, torna-se evidente a necessidade de conhecimento técnico especializado para reconhecer a diversidade de contextos e formas de apresentação da exposição, como o reconhecimento da LCIR em indivíduos assintomáticos, que podem manifestar sinais clínicos somente dias ou semanas após o evento de exposição, ou até mesmo na ausência de confirmação de um desastre nuclear (Dainiak; Wingard; Kazzi, 2024).

Alterações como eritrodermia inexplicada, sintomas gastrointestinais, citopenias ou distúrbios neurológicos devem, portanto, ser avaliadas sob a hipótese de uma possível lesão por radiação (Dainiak; Wingard; Kazzi, 2024). Nesse âmbito, o relatório publicado pela IAEA

(2020) destaca tanto os eritemas precoces quanto as ulcerações e necroses como indicadores prognósticos relevantes em casos de LCIR.

Assim, o processo de triagem em acidentes radiológicos demanda não apenas protocolos claros, mas também profissionais habilitados para reconhecer a variedade de manifestações clínicas, interpretar adequadamente os sinais precoces e selecionar os métodos diagnósticos mais pertinentes a cada caso. A ausência dessa expertise pode comprometer tanto a classificação dos pacientes quanto a definição do tratamento apropriado, visto que, a depender da dose absorvida, a pele e tecidos subjacentes podem apresentar consequências médicas graves, podendo o paciente desenvolver o quadro de SAR a partir de uma LCIR (Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

Como brevemente mencionado anteriormente, a SAR corresponde a um conjunto de manifestações clínicas relacionadas aos efeitos teciduais da exposição. Trata-se de um termo que descreve sinais e sintomas decorrentes de danos em sistemas orgânicos específicos, os quais podem evoluir para óbito em um intervalo que varia de poucas horas a vários meses após a exposição. Tal síndrome manifesta-se em decorrência da irradiação de corpo inteiro ou de uma porção significativa do corpo, em doses a partir de 1 Gy, administradas em curto intervalo de tempo e com alta taxa de dose, resultando em intensa e acelerada morte celular. É válido ressaltar que a reação de cada indivíduo depende de variáveis independentes, como dose, taxa de dose, natureza e energia da radiação, tipo e volume do tecido irradiado, idade, estado de saúde prévio e qualidade dos cuidados médicos disponíveis (Dainiak, 2018; Waselenko *et al.*, 2004 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

No âmbito do atendimento emergencial, o protocolo europeu “Medical Treatment Protocols for Radiation Accident Victims”, que descreve os aspectos fisiopatológicos do desenvolvimento da SAR, considera as primeiras 48 horas após o acidente como período crucial para a triagem. Nessa fase, os pacientes devem ser avaliados por meio de critérios clínicos e biológicos que classificam a extensão dos danos nos sistemas neurovascular, hematopoiético e gastrointestinal. Entre os parâmetros considerados, estão: tempo de aparecimento dos sintomas, eritemas cutâneos, intensidade da astenia, náuseas, frequência de vômitos e evacuações em 24 horas, além de dor, cefaleia, alterações de pressão arterial, febre e perda temporária de consciência (Fliedner; Friesecke; Beyrer, 2001 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

O acidente radiológico de Goiânia exemplifica como o reconhecimento precoce da SAR é essencial. Na época, o diagnóstico da SAR resultou de uma abordagem integrada que considerou, simultaneamente, os sinais clínicos inespecíficos, as lesões cutâneas

características de radiação ionizante, os exames hematológicos e bioquímicos, além de diferentes métodos de dosimetria. Essa combinação permitiu não apenas confirmar os casos, mas também fornecer subsídios essenciais para o tratamento e acompanhamento dos pacientes afetados ao identificar com clareza os níveis diferenciados de gravidade da doença (IAEA, 1988; Ramalho; Nascimento; Natarajan, 1988).

A evolução clínica da SAR pode ser dividida em três fases: período prodrômico, período latente e fase de manifestação da doença propriamente dita. O período prodrômico caracteriza-se por sintomas imediatos, como náusea, vômito, diarreia, anorexia, apatia, febre, taquicardia e dor de cabeça, podendo surgir em minutos ou horas após a exposição a doses de aproximadamente 1 Gy e perdurar por até dois dias. Em exposições totais de 1 Gy ou menos, esses sintomas costumam ser leves ou ausentes, enquanto o início dos sintomas nas primeiras duas horas após a exposição indica doses potencialmente letais superiores a 2 Gy. Já o período latente corresponde ao intervalo em que não há sinais clínicos de mal-estar, podendo variar de dois a vinte dias, embora, em doses muito altas, ele desapareça completamente. Ressalta-se que, por vezes, este período é erroneamente interpretado como uma recuperação, o que pode comprometer a avaliação clínica (Waselenko *et al.*, 2004 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

As síndromes clínicas clássicas da SAR incluem a cerebrovascular, a gastrointestinal e a hematopoiética que frequentemente apresentam sobreposição de sintomas. O início, a duração e a manifestação predominante dependem diretamente da dose absorvida (López; Martín, 2011 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024). No caso da síndrome neurovascular, também chamada de cerebrovascular, observa-se sua manifestação em doses totais de 10 Gy ou mais, podendo chegar a 20 Gy. Os pacientes apresentam náuseas e vômitos intensos, cefaleia, déficits neurológicos, alterações cognitivas, dano à barreira hematoencefálica, edema intersticial, inflamação meníngea, desorientação, confusão, ataxia e convulsões (Singh *et al.*, 2018 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

A síndrome gastrointestinal, por sua vez, desenvolve-se geralmente entre três e cinco dias após a exposição a doses entre 5 e 12 Gy. Os sintomas incluem cólicas abdominais, diarreia, náuseas, vômitos e sangramentos digestivos, acompanhados de desequilíbrios hidroeletrólíticos. Nos quadros mais graves, há febre elevada, desnutrição por má absorção, ulceração e necrose da mucosa intestinal, além da passagem de bactérias e toxinas para a corrente sanguínea, o que favorece infecções e sepse, potencializadas pelo comprometimento hematopoiético (Garau; Caldach; López, 2011 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

Por fim, a síndrome hematopoiética manifesta-se quando há exposição do corpo inteiro a doses a partir de 2-3 Gy. A princípio, é caracterizada pela linfopenia, a qual precede a depressão dos demais elementos celulares, podendo se desenvolver nas primeiras 6 a 24 horas após a irradiação. Nesse contexto, o declínio de 50% na contagem absoluta de linfócitos nas primeiras 24 horas, seguido por uma queda ainda mais acentuada em 48 horas, indica uma exposição potencialmente fatal, na faixa de 5 a 10 Gy. Por outro lado, uma contagem de linfócitos que se mantém acima de 50% do normal durante a primeira semana sugere uma exposição inferior a 1 Gy e, conseqüentemente, uma probabilidade de sobrevivência superior a 90%. Ademais, a anemia torna-se inevitável, ocorrendo em virtude da perda sanguínea gastrointestinal, de hemorragias em órgãos e tecidos decorrentes da trombocitopenia e da aplasia da medula óssea, fazendo com que na ausência de suporte médico apropriado o paciente pode vir a óbito (López; Martín, 2011 *apud* Costa; Ietsugu; Bolognesi, 2024).

Diante desse panorama geral, a avaliação da queda na contagem absoluta de linfócitos no hemograma se mostra uma ferramenta prática e confiável para estimar a dose de exposição no processo de triagem (Nair; Karan; Makhani, 2017), uma vez que a exposição à RI danifica diretamente as células-tronco hematopoiéticas e altera a capacidade dos elementos do estroma da medula óssea de manter a hematopoiese. Esse processo induz o declínio da quantidade de células hematopoiéticas circulantes, não apenas pela produção reduzida na medula óssea, mas também pela redistribuição e apoptose dos elementos maduros do sangue. Nesse contexto, a cinética de depleção de linfócitos tem sido destacada como uma ferramenta de grande relevância para fornecer estimativas iniciais de dose, sobretudo em situações emergenciais que envolvem um grande número de indivíduos expostos, como em acidentes nucleares ou ataques terroristas (Dainiak, 2002).

Os declínios progressivos nas contagens de linfócitos, granulócitos, eritrócitos e plaquetas foram descritos de forma sistemática em estudos clássicos. Em geral, os linfócitos sofrem depleção em poucas horas, os granulócitos em dias a semanas, os eritrócitos em semanas, e as plaquetas tendem a diminuir entre 5 e 10 dias após a exposição (Dainiak, 2002). A alta radiosensibilidade (0,2–0,3 Gy) do linfócito pequeno reforça sua utilidade como marcador precoce da intensidade da exposição, de modo que, segundo Dainiak (2002) contagem absoluta de linfócitos é considerada o teste laboratorial mais prático e confiável para avaliação inicial da dose.

Além disso, embora a neutropenia ocorra de forma consistente após a exposição de corpo inteiro, sua manifestação é mais tardia do que a linfopenia, ocorrendo entre 3 e 4 semanas, sendo tal declínio precedido por um quadro transitório de granulocitose. Já as

plaquetas apresentam declínio precoce, mas sua recuperação depende não apenas da dose absorvida, mas também da ocorrência de complicações clínicas, como hemorragias ou lesões intestinais. Em alguns casos, como entre os trabalhadores de limpeza de Chernobyl, observou-se recuperação espontânea das contagens de granulócitos em 20 - 30 dias, atribuída à presença de subpopulações celulares radorresistentes (Dainiak, 2002).

Em situações de desastres nucleares, a dosimetria biológica pode ser a única alternativa para quantificar a dose, ainda que apresente limitações relacionadas a exposições não uniformes, incorporação de radionuclídeos e coleta tardia de amostras de sangue (IAEA, 2011). Como outrora mencionado, a biodosimetria fundamenta-se na utilização de indicadores biológicos capazes de fornecer informações preliminares e relevantes sobre a faixa de dose de exposição (Gnanasekaran, 2021), destacando-se como excelentes biodosimétricos; o sangue, já discutido anteriormente; a urina e as fezes.

Como observado nos casos de Goiânia e de Alexander Litvinenko (IAEA, 1988; Owen, 2016), os bioensaios de urina e fezes configuram-se como métodos fundamentais para a avaliação da incorporação de radionuclídeos no organismo humano, sendo amplamente empregados na confirmação diagnóstica de contaminação por altas doses de RI. De modo geral, esses métodos apresentam alta viabilidade operacional, possibilitando a estimativa da carga corporal de material radioativo internalizado (IAEA, 2020).

A urina é considerada a amostra biológica preferencial em situações de contaminação interna, especialmente quando envolve compostos solúveis, devido à sua praticidade e ao fato de permitir medições em uma ampla gama de radionuclídeos. As amostras devem ser devidamente coletadas e rotuladas, com o registro do horário de coleta, uma vez que os modelos biocinéticos utilizados para a interpretação dos resultados baseiam-se em taxas diárias de excreção. Por essa razão, amostras de 24 horas são geralmente preferidas, pois os modelos biocinéticos utilizados para interpretar os dados baseiam-se em taxas de excreção diárias (IAEA, 2020). Todavia, em situações nas quais as amostras de 24 horas não podem ser obtidas, é necessária a aplicação de correções relacionadas à concentração da urina, de forma a compensar variações fisiológicas, como alterações na ingestão de líquidos ou na perda excessiva de água por transpiração (Bodin; Menetrier, 2021).

Ademais, conforme apontam Bodin e Menetrier (2021), é basilar ressaltar que amostras coletadas nas primeiras 24 horas pós-exposição podem apresentar baixo valor diagnóstico e devem ser interpretadas com cautela, visto que muitos materiais levam tempo para alcançar a corrente sanguínea e serem filtrados pelos rins, além do conteúdo residual

acumulado na bexiga ser capaz de interferir nos resultados (IAEA, 2000; Bodin; Menetrier, 2021).

Paralelamente, a análise de fezes constitui outro método relevante para a avaliação indireta da incorporação interna, sendo particularmente útil na detecção de exposições por inalação de formas relativamente insolúveis de radionuclídeos, cuja excreção ocorre predominantemente por via fecal. Contudo, essa técnica apresenta limitações significativas decorrentes da variabilidade no tempo de trânsito intestinal e na massa das evacuações, fatores que introduzem incertezas consideráveis nas estimativas. Diante disso, recomenda-se a coleta integral das excreções fecais por um período de três a quatro dias, a fim de garantir maior confiabilidade nas taxas médias de excreção (Bodin; Menetrier, 2021).

Além dessas variações fisiológicas, deve-se considerar a possível presença de materiais ingeridos nas primeiras amostras, o que pode interferir na análise. Outro aspecto crítico refere-se à susceptibilidade das amostras fecais à biodegradação, exigindo processamento imediato, calcinação ou congelamento profundo para preservação. Ademais, essas amostras podem conter contaminantes biológicos potencialmente tóxicos, sendo necessário adotar medidas de segurança durante o manuseio. Em razão disso, a análise pode ser conduzida por meio de procedimentos de calcinação úmida ou seca, com posterior quantificação dos radionuclídeos presentes na fração volátil ou nas cinzas residuais (IAEA, 2000).

Portanto, a interpretação das manifestações clínicas, a monitorização hematológica e a biodosimetria por urina e fezes se mostram ferramentas complementares na avaliação da contaminação interna por radionuclídeos, desempenhando papel essencial na confirmação diagnóstica e no monitoramento das vítimas expostas à radiação ionizante. Contudo, para confirmar o diagnóstico de contaminação por radiação é necessário realizar outros métodos de biodosimetria, como a dosimetria citogenética. Destacando-se, o CBMN, o DCA e o FISH, pois oferecem maior especificidade e confiabilidade no prognóstico dos efeitos da radiação (IAEA, 2020).

6.2. Exames Citogenéticos e Método Padrão-Ouro

A biodosimetria citogenética constitui uma ferramenta essencial em situações de exposição à altas doses de RI, uma vez que a partir dela pode-se avaliar a frequência de aberrações cromossômicas instáveis ou estáveis, correlacionando-as de forma positiva com a dose de radiação (IAEA, 2011).

Nesse contexto, a aplicação de ensaios rápidos de dosimetria citogenética também mostra-se indispensável como forma de triagem, cujo intuito é distinguir os indivíduos gravemente acometidos (≥ 1 Gy), que demandam tratamento médico imediato, daqueles menos expostos. Segundo a IAEA (2011) estudos confirmaram a eficácia do CBMN como ferramenta confiável e rápida para a triagem populacional em casos de desastres nucleares devido a correlação direta entre o número de MN induzidos pela radiação e a dose absorvida. Além disso, sua eficácia também foi observada no estudo realizado em Chernobyl entre 1989 e 1991, no qual o CBMN foi utilizado com sucesso para avaliar a exposição prolongada de indivíduos a RI (IAEA, 2011).

De acordo com a IAEA (2011), no CBMN, é recomendado a contagem de 1000 células binucleadas; entretanto, foi demonstrado que a pontuação de apenas 200 células é suficiente para identificar doses superiores a 1 Gy. A contagem dessas 200 células pode levar poucas horas, o que representa um processo consideravelmente mais rápido do que outros métodos de dosimetria citogenética, como o DCA. Além da rapidez, destaca-se como vantagem o fato de que o nível de especialização e o treinamento exigidos para a execução do CBMN são menores do que os requeridos para o ensaio de dicêntricos, o que permitiria capacitar analistas de forma mais célere em situações de emergências envolvendo múltiplas vítimas (IAEA, 2011).

Apesar dessas vantagens, o CBMN apresenta limitações relevantes que precisam ser consideradas. Conforme discutem Vral, Fenech e Thierens (2011), as principais restrições do método estão associadas à dosimetria retrospectiva e aos acidentes que envolvem irradiação parcial do corpo. A tendência de subestimar as doses de radiação em coletas de sangue realizadas tardiamente ocorre porque os MN e os DIC refletem aberrações cromossômicas instáveis, que possuem persistência *in vivo* limitada, especialmente após exposições a doses elevadas (Vral; Fenech; Thierens, 2011).

Outra limitação apontada por Vral, Fenech e Thierens (2011) refere-se à ocorrência de exposições parciais do corpo, situação comum em desastres nucleares. Nesses casos, os linfócitos não danificados do sangue periférico localizados fora do campo de irradiação

diluirão o rendimento de aberrações, levando a uma subestimação da dose no tecido exposto. Nesses casos, o ensaio de dicêntricos, no entanto, permite uma estimativa da parte não exposta do corpo ao comparar a distribuição das aberrações entre as células com a distribuição de Poisson (Vral; Fenech; Thierens, 2011).

Desse modo, a distribuição dos MN apresenta leve superdispersão, o que reduz o poder de análise do CBMN em casos de irradiação parcial, tornando a interpretação dos

resultados menos confiável e demandando estudos adicionais para sua validação (Vral; Fenech; Thierens, 2011).

Já nos outros ensaios citogenéticos relacionados a aberrações cromossômicas, é válido ressaltar que eles diferem quanto ao tipo de análise e o cenário de exposição. O ensaio de cromossomos dicêntricos observa a presença ou ausência de DIC, enquanto o FISH avalia translocações cromossômicas (Nakayama *et al.*, 2022). Desse modo, a seleção do método citogenético para fins diagnósticos deve considerar critérios específicos, como o tempo decorrido entre a exposição e a coleta de sangue, a dose presumida com base nos sintomas prodrômicos e o número de indivíduos expostos que necessitam de análise. Ademais, o método escolhido deve atender a três requisitos fundamentais: especificidade, estabilidade e dependência da dose (Nakayama *et al.*, 2022).

Em específico, a aplicação do DCA em Goiânia, TMI, Chernobyl e Fukushima demonstrou não apenas sua utilidade prática, mas também contribuiu para a delimitação de suas limitações (Ramalho; Nascimento; Natarajan, 1988; Shevchenko; Snigiryova, 1999; WHO, 2006; Suto, 2016). Por conseguinte, tal técnica consolidou-se como o padrão-ouro da biodosimetria, uma vez que atende a todos os três requisitos de um dosímetro biológico, sendo oficialmente reconhecida como o método de maior precisão para avaliação da exposição à RI (IAEA, 2011).

Um dos pontos que reforçam a confiabilidade do DCA é a baixa frequência de ocorrência espontânea de DIC, inferior a um por 1000 metáfases. Tal característica confere ao método alta especificidade, tornando desnecessária a consideração de fatores como idade, gênero ou histórico de tabagismo, visto que os DIC resultam quase exclusivamente da exposição à radiação, diferentemente de outras aberrações (Bochkov *et al.*, 2001 *apud* Nakayama *et al.*, 2022).

Para a correta identificação dessas aberrações, a compreensão das características morfológicas dos cromossomos humanos é fundamental, já que a confirmação da presença de DIC exige a verificação do número de cromossomos nos grupos envolvidos (Miura *et al.*, 2021 *apud* Nakayama *et al.*, 2022). Recentemente, avanços tecnológicos, como o uso da hibridização *in situ* por fluorescência, permitiram marcar centrômeros, aumentando a precisão da detecção de DIC. Contudo, para fins de emissão de estimativas preliminares de dose e diagnóstico rápido, a análise de amostras coradas com Giemsa ainda é a mais empregada devido seu elevado nível de confiabilidade (M'kacher *et al.*, 2014 *apud* Nakayama *et al.*, 2022).

Apesar de sua reconhecida eficácia, o DCA apresenta desvantagens relacionadas ao tempo necessário para a obtenção dos resultados. O processo envolve a coleta de sangue 24 horas após a exposição, seguida de 48 horas de cultivo celular, além das etapas subsequentes. Como consequência, o relatório preliminar de dose leva, no mínimo, 78 horas após o acidente (54 horas a partir do recebimento do sangue), enquanto o relatório final pode demandar entre 129 e 153 horas (105 a 129 horas após o recebimento do material) (Nakayama *et al.*, 2022).

Outro aspecto relevante diz respeito às limitações do DCA em exposições de alta dose. O método não é recomendado acima do limite aplicável de 5 Gy, pois, nessas condições, o dano extenso ao DNA provoca atrasos ou bloqueios no ciclo celular, reduzindo drasticamente o número de células em metáfase disponíveis para análise (Marder; Morgan, 1993 *apud* Nakayama *et al.*, 2022). Assim, embora o DCA permaneça como o método preferencial na maioria dos casos de exposição, seu emprego deve considerar tanto o tempo necessário para execução quanto às limitações associadas às altas doses de radiação (Nakayama *et al.*, 2022).

Por outro lado, o princípio do FISH baseia-se na utilização de sequências específicas de DNA como sondas direcionadas a regiões determinadas do genoma, as quais são visualizadas por meio da fixação de fluorocromos distintos, que destacam os cromossomos em diferentes cores. Consequentemente, as translocações podem ser observadas como rearranjos coloridos ao microscópio de fluorescência. Entretanto, essa estratégia demanda a análise de um número maior de metáfases em comparação ao DCA, o que reforça a necessidade de preparar lâminas com elevada quantidade de metáfases em condições adequadas de qualidade (IAEA, 2011).

Embora o DCA seja considerado o padrão-ouro da dosimetria biológica, ele apresenta uma limitação fundamental: a instabilidade mitótica das aberrações, que leva ao seu desaparecimento progressivo com o tempo. Isso ocorre porque os dicêntricos, induzidos inicialmente em frequência semelhante às translocações, são eliminados durante as divisões celulares subsequentes, por morte celular ou substituição por novas células sanguíneas. Em contraste, as translocações são mitoticamente estáveis e podem ser transmitidas para linfócitos maduros sempre que forem originadas em células-tronco hematopoiéticas. Essa estabilidade confere às translocações uma utilidade particular para a dosimetria retrospectiva, sobretudo em casos de exposições ocorridas há longo tempo (IAEA, 2011).

Na prática, a reconstrução de dose baseada em translocações parte da premissa de que as frequências observadas *in vitro* em linfócitos irradiados refletem, de forma semelhante, às alterações ocorridas *in vivo* em células-tronco hematopoiéticas. Embora não seja possível

afirmar com absoluta certeza que a radiosensibilidade das células-tronco seja idêntica à dos linfócitos maduros, a literatura sugere que esse fator não compromete a aplicabilidade do método, e que eventuais divisões celulares intermediárias não interferem de forma significativa nos resultados (IAEA, 2011).

Todavia, no campo da biodosimetria retrospectiva, apesar do FISH apresentar grande potencial para extrair o máximo de informação a partir de cada metáfase, existem certas ressalvas que precisam ser consideradas, pois variáveis como idade, gênero, raça e tabagismo são capazes de influenciar a frequência das translocações. Em particular, estudos indicam que o tabagismo intensifica a taxa de translocações em trabalhadores expostos à RI (IAEA, 2011).

Em síntese, a análise de translocações estáveis representa uma metodologia consolidada para a reconstrução retrospectiva de dose, especialmente útil em exposições prolongadas e de baixa intensidade, nas quais predomina a resposta linear das curvas de calibração. Já o DCA mostra-se particularmente vantajoso em situações de exposição aguda e de curta duração, nas quais é necessário uma avaliação rápida e precisa da dose absorvida, enquanto o CBMN destaca-se como ferramenta confiável e rápida para a triagem inicial (IAEA, 2011).

Portanto, a avaliação de vítimas expostas à RI exige uma abordagem integrada, combinando métodos clínicos, laboratoriais e citogenéticos conforme a gravidade e o tempo da exposição. O conhecimento e domínio dessas ferramentas é essencial para o profissional da saúde, pois permite otimizar recursos, prever a evolução clínica, reconhecer lesões por radiação, evitar interpretações errôneas e aplicar corretamente cada método diagnóstico. Em suma, o conhecimento e a aplicação adequados desses procedimentos são fundamentais para uma resposta eficiente, segura e capaz de preservar vidas em situações de acidentes nucleares.

7 CONCLUSÃO

A identificação precoce de exposições e contaminação por RI, bem como a determinação precisa das doses absorvidas, constitui etapa essencial na resposta a desastres nucleares, permitindo avaliar os riscos e orientar condutas médicas adequadas.

Inicialmente, é fundamental realizar medições com dosímetros, de modo a identificar a possibilidade de contaminação externa ou interna e, assim, direcionar os procedimentos subsequentes. Entretanto, apenas o conhecimento e a utilização da dosimetria física não são suficientes, como evidenciado no caso de Fukushima, em que, devido aos desastres naturais, boa parte dos medidores de radiação foi perdida. Por conseguinte, é essencial saber identificar os sinais clínicos da contaminação por radiação.

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho evidencia a relevância de estratégias eficazes de triagem e diagnóstico em situações de exposição à radiação ionizante, sejam elas decorrentes de acidentes ou de ataques nucleares. Diante da gravidade e complexidade clínica da contaminação por radiação, torna-se indispensável a presença de profissionais de saúde devidamente capacitados para reconhecer precocemente os sinais clínicos característicos, como febre, náuseas, diarreia e alterações hematológicas. Essa habilidade é fundamental não apenas para orientar condutas imediatas, mas também para evitar diagnósticos equivocados que possam comprometer a intervenção médica e o acompanhamento a longo prazo.

Portanto, destacam-se como métodos de triagem iniciais: a observação criteriosa das manifestações clínicas, a realização de hemogramas e o CBMN, que permitem uma avaliação preliminar do comprometimento hematopoiético e do grau de exposição.

Embora essas ferramentas forneçam informações valiosas em cenários emergenciais, é a confirmação diagnóstica que garante maior precisão na mensuração da dose absorvida e na definição do manejo clínico. Dentre os métodos, destaca-se a biodosimetria de amostras biológicas e a biodosimetria citogenética por meio da análise de cromossomos dicêntricos, a qual consolida-se como padrão-ouro, visto que apresenta elevada sensibilidade e confiabilidade na quantificação da dose de radiação. A relação direta entre a frequência dessas aberrações cromossômicas e a dose recebida constitui um parâmetro robusto para a tomada de decisão médica e para o monitoramento dos efeitos biológicos a longo prazo. Além disso, técnicas como o FISH, configuram alternativas complementares, sendo aplicáveis em contextos específicos, como para estudos retrospectivos e de longo prazo devido sua estabilidade mitótica.

Em decorrência disso, conclui-se que a integração entre a capacidade técnica dos profissionais de saúde e o emprego adequado dos métodos de triagem e diagnóstico revela-se essencial para a proteção da vida e da saúde das populações expostas. Em especial, a valorização da biodosimetria citogenética reafirma a importância de investimentos contínuos em pesquisa, infraestrutura laboratorial e capacitação profissional, garantindo respostas mais seguras e eficazes frente a desastres nucleares. Ademais, ressalta-se a necessidade de conduzir mais estudos voltados à prospecção de eventos radiológicos com base em dados estatísticos, de modo a aprimorar a capacidade preditiva e a eficiência das ações preventivas e de resposta em situações de emergência radiológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BBC News Brasil. **O início da invasão da Ucrânia pela Rússia em 12 imagens**. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-60508891>. Acesso em: 07 out. 2025.
- BEIR V. **Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation**: Beir V. Washington: NASEM, 1990. *E-book*. DOI 10.17226/1224. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218706/>. Acesso em: 19 set. 2025
- BELI, D.; KOVALENKO, A.; BAZYKA, D. Acute Radiation Syndrome Survivors after Chernobyl Accident: history of irradiation, diagnostic mistakes and death reasons in long-term period. **Radiation Emergency Medicine**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 5-12, 2013.
- BODIN, L.; MENETRIER, F. Treatment of radiological contamination: a review. **Journal Of Radiological Protection**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 427-437, 10 nov. 2021. DOI 10.1088/1361-6498/ac241b.
- BRASIL. **Resolução Rdc Nº 611**. 9 de março de 2022. 51. ed. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-rdc-n-611-de-9-de-marco-de-2022-386107075>. Acesso em: 13 out. 2025.
- BRASIL. Governo de Goiás. Secretaria de Estado da Saúde. **História do Césio 137 em Goiânia**. 2024. Disponível em: <https://goias.gov.br/saude/historia-do-cesio-137-em-goiania/>. Acesso em: 19 set. 2025.
- CALADO, R. T.; FALCÃO, R. P. Heterogeneidade das Células do Sangue. Órgãos Hematopoéticos e Linfopoéticos. In: ZAGO, Marco Antonio *et al.* (ed.). **Tratado de hematologia**. São Paulo: Atheneu, 2013. Cap. 1, p. 3.
- CASTRO-VOLIO, I. Indicadores citogenéticos para la identificación de exposición a radiación ionizante en humanos. **Acta Médica Costarricense**, Costa Rica, v. 55, n. 3, p. 110-117, 2013.
- CNEN. **Norma CNEN NN 3.01**: Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação. Rio de Janeiro, 2024.
- CNN Brasil. **Ataque dos EUA destruiu apenas uma instalação nuclear do Irã, diz jornal**. 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/ataque-dos-eua-destruiu-apenas-uma-instalacao-nuclear-do-ira-diz-jornal/>. Acesso em: 07 out. 2025.
- COLLUM, Bill. Radiological zoning. **Nuclear Facilities**, [s. l.], p. 61-75, 2017. DOI 10.1016/b978-0-08-101938-2.00003-9.
- COSTA, Y. A. P.; IETSUGU, M. do Val; BOLOGNESI, L. Efeitos biológicos da radiação e síndrome aguda das radiações. **Tekhne e Logos**. Botucatu, v. 15, n. 1, p. 121-136, abr. 2024.
- CRUZ, A.D. da *et al.* Human micronucleus counts are correlated with age, smoking, and cesium-137 dose in the Goiânia (Brazil) radiological accident. **Mutation**

Research/Environmental Mutagenesis And Related Subjects, [s. l.], v. 313, n. 1, p. 57-68, ago. 1994. DOI 10.1016/0165-1161(94)90033-7.

DAINIYAK, N. Hematologic consequences of exposure to ionizing radiation. **Experimental Hematology**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 513-528, jun. 2002. DOI 10.1016/s0301-472x(02)00802-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301472X02008020>. Acesso em: 29 set. 2025.

DAINIYAK, N.; WINGARD, J. R.; KAZZI, Z. **Clinical manifestations, evaluation, and diagnosis of acute radiation exposure**. 2024. Disponível em: <https://www.uptodate.com/contents/clinical-manifestations-evaluation-and-diagnosis-of-acute-radiation-exposure#H16745293>. Acesso em: 29 set. 2025.

DEVI, R. *et al.* Efficacy of advanced concretes for attenuation of ionizing radiations: a comprehensive review and comparison. **Progress In Nuclear Energy**, [s. l.], v. 178, p. 2-25, jan. 2025. DOI 10.1016/j.pnucene.2024.105502. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197024004529#bib104>. Acesso em: 10 out. 2025.

DONNELLY, E. H. *et al.* Acute Radiation Syndrome: Assessment and Management. **SMJ**. Birmingham, v. 103, n. 6, p. 541-544, jun. 2010.

EUA. DHS. **Nuclear Attack Fact Sheet**. 2022. Disponível em: <https://www.dhs.gov/publication/nuclear-attack-fact-sheet>. Acesso em: 21 set. 2025.

EUA. DOE. **DOE Explains...Nuclear Fission**. 2018. Disponível em: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsnuclear-fission>. Acesso em: 22 set. 2025.

EUA. NRC. **Backgrounder on the Three Mile Island Accident**. 2024. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle>. Acesso em: 21 set. 2025.

FERRO, M. S.. Acidentes Nucleares. In: GOMES, C. A. **Direito(s) dos riscos tecnológicos**. Lisboa: AAFD, 2014. p. 191-237. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3077289. Acesso em: 07 out. 2025.

GALINDO, A. **What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power**. 2022. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power>. Acesso em: 10 out. 2025.

GALINDO, A. **What is Radiation?**. 2023. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radiation>. Acesso em: 18 set. 2025.

GARCIA, E. A. C. **Biofísica**. 2. ed. São Paulo: Sarvier, 2015. 525 p.

GNANASEKARAN, T. S. Cytogenetic biological dosimetry assays: recent developments and updates. **Radiation Oncology Journal**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 159-166, 30 set. 2021. DOI 10.3857/roj.2021.00339. Disponível em: <https://www.e-roj.org/journal/view.php?number=1493>. Acesso em: 29 set. 2025.

G1. **Hamás diz que ataque de 7 de Outubro foi 'resposta histórica' a Israel e impõe condições para cessar-fogo.** 2025. Disponível em:

<https://g1.globo.com/mundo/noticia/2025/10/07/hamas-diz-que-ataque-terrorista-7-de-outubro-foi-resposta-historica-ocupacao-israelense.ghtml>. Acesso em: 07 out. 2025.

HARDING, L. **Alexander Litvinenko: the man who solved his own murder.** 2016.

Disponível em:

<https://www.theguardian.com/world/2016/jan/19/alexander-litvinenko-the-man-who-solved-his-own-murder>. Acesso em: 13 out. 2025.

HARRISON, J. *et al.* Collateral contamination concomitant to the polonium-210 poisoning of Mr Alexander Litvinenko. **Journal Of Radiological Protection**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 837-851, 14 set. 2017. DOI 10.1088/1361-6498/aa80f5.

HENDEE, W. R.; EDWARDS, F. M. ALARA and an integrated approach to radiation protection. **Seminars In Nuclear Medicine**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 142-150, abr. 1986. DOI 10.1016/s0001-2998(86)80027-7. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001299886800277>. Acesso em: 07 out. 2025.

IAEA. **Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine.** Viena: IAEA, 2006. 57 p.

IAEA. **Cytogenetic Dosimetry: applications in preparedness for and response to radiation emergencies.** Viena: IAEA, 2011. 229 p.

IAEA. **Indirect Methods for Assessing Intakes of Radionuclides Causing Occupational Exposure.** Viena: IAEA, 2000.

IAEA. **Medical Management of radiation injuries.** Viena: IAEA, 2020. 98 p.

IAEA. **Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards.** Viena: IAEA, 2014. *E-book*. 435 p. DOI 10.61092/iaea.u2pu-60vm. Disponível em: <https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>. Acesso em: 19 set. 2025.

IAEA. **The radiological accident in Goiania.** Viena: IAEA, 1988. 149 p.

IAEA. **Update 319 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine.** 2025.

Disponível em:

<https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-319-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>. Acesso em: 07 out. 2025.

IARC. **Ionizing Radiation, Part 1: X- and Gamma (γ)-Radiation, and Neutrons.** França: IARC, 2000. *E-book*. 457 p. Disponível em:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK401323/>. Acesso em: 18 set. 2025.

IZEWSKA, J.; RAJAN, G. Chapter 3: radiation dosimeters. In: PODGORSK, E. B. (ed.). **Radiation Oncology Physics: a handbook for teachers and students**. Viena: IAEA, 2005. p. 59.

KEARNS, R. D.; HICKERSON, W. L.; CARTER, J. E. Radiation Injuries. **Surgical Clinics**. Missouri, v. 103, n. 3, p. 539-550, jun. 2023. DOI 10.1016/j.suc.2023.01.011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039610923000117>. Acesso em: 17 set. 2025.

KERMENGUY, F. de *et al.* Radio-induced lymphopenia in the era of anti-cancer immunotherapy. In: VEGA, F. Aranda; BERRAONDO, P.; GALLUZZI, L. (ed.). **International Review of Cell and Molecular Biology**. Londres: Elsevier, 2023. Cap. 1. p. 1-30.

LALIC, S. de S. *et al.* Novos Materiais Dosimétricos para Aplicações em Física Médica. **Revista Brasileira de Física Médica**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 24, 1 set. 2019. DOI 10.29384/rbfm.2019.v13.n1.p24-33.

LEITE, T. C. S. de B. **Orientação Diagnóstica das Síndromes Aguda e Cutânea da Radiação: uma proposta de educação médica continuada**. 2017. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ensino em Ciências da Saúde e do Meio Ambiente) - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2017.

LEROY, G. V. The Medical Sequelae of the Atomic Bomb Explosion. **The Journal Of The American Medical Association**. Chicago, p. 1143-1148. 2 ago. 1947.

LESSARD, E. T. *et al.* **Thyroid absorbed dose for people at Rongelap, Utrik and Sifo on March 1, 1954**. Upton, NY: Brookhaven National Laboratory, Safety and Environmental Protection Division; 1985.

LI, C. *et al.* Requirements for radiation emergency urine bioassay techniques for the public and first responders. **Health Physics**, [s. l.], v. 99, n. 5, p. 702-707, nov. 2010. DOI 10.1097/hp.0b013e3181de04ec. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/47396019_Requirements_for_radiation_emergency_urine_bioassay_techniques_for_the_public_and_first_responders. Acesso em: 15 out. 2025.

LIMA, I. H. S. de *et al.* Acidente Nuclear de Chernobyl: os efeitos biológicos da radiação. **Ciências Biológicas e de Saúde Unit**, Aracaju, v. 6, n. 1, p. 107-120, mar. 2020.

MCFEE, R. B.; LEIKIN, J. B. Death by Polonium-210: lessons learned from the murder of former soviet spy alexander litvinenko. **Seminars In Diagnostic Pathology**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 61-67, fev. 2009. DOI 10.1053/j.semmp.2008.12.003.

MURSHED, H. Radiation Biology. **Fundamentals Of Radiation Oncology**, [s. l.], p. 57-87, 2019. DOI 10.1016/b978-0-12-814128-1.00003-9.

MÜSSIG, Dirk. **Re-scanning in scanned ion beam therapy in the presence of organ motion**. 210 p. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Naturais, Universidade Técnica de Darmstadt, Darmstadt, 2014. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/264422784_Re-scanning_in_scanned_ion_beam_therapy_in_the_presence_of_organ_motion. Acesso em: 10 out. 2025.

NAGATAKI, S. *et al.* Measurements of Individual Radiation Doses in Residents Living Around the Fukushima Nuclear Power Plant. **Radiation Research**, [s. l.], v. 180, n. 5, p. 439-447, nov. 2013. DOI 10.1667/rr13351.1. Disponível em: <https://bioone.org/journals/radiation-research/volume-180/issue-5/RR13351.1/Measurements-of-Individual-Radiation-Doses-in-Residents-Living-Around-the/10.1667/RR13351.1.full>. Acesso em: 25 set. 2025.

NAGATAKI, S.; TAKAMURA, N.. A review of the Fukushima nuclear reactor accident: radiation effects on the thyroid and strategies for prevention. **Current Opinion In Endocrinology, Diabetes & Obesity**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 384-393, out. 2014. DOI 10.1097/med.0000000000000098.

NAIR, V.; KARAN, D.N.; MAKHANI, C.S. Guidelines for medical management of nuclear/radiation emergencies. **Medical Journal Armed Forces India**, [s. l.], v. 73, n. 4, p. 388-393, out. 2017. DOI 10.1016/j.mjafi.2017.09.015. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5771710/#sec0035>. Acesso em: 29 set. 2025.

NAKAYAMA, R. *et al.* Cytogenetic Biodosimetry in Radiation Emergency Medicine: 4. overview of cytogenetic biodosimetry. **Radiation Environment And Medicine**, [s. l.], v. 11, p. 91-103, 29 ago. 2022. DOI 10.51083/radiatenviroinmed.11.2_91.

NATARAJAN, A.T. *et al.* A cytogenetic follow-up study of the victims of a radiation accident in Goiania (Brazil). **Mutation Research/Fundamental And Molecular Mechanisms Of Mutagenesis**, [s. l.], v. 247, n. 1, p. 103-111, mar. 1991. DOI 10.1016/0027-5107(91)90038-p.

NATGEO. **Qual foi o papel de Oppenheimer no primeiro teste nuclear da história?** Descubra este e outros fatos sobre o Trinity. 2025. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/historia/2024/07/qual-foi-o-papel-de-oppenheimer-no-primeiro-teste-nuclear-da-historia-descubra-este-e-outros-fatos-sobre-o-trinity>. Acesso em 21 set. 2025.

OKUNO, E. As bombas atômicas podem dizimar a humanidade - Hiroshima e Nagasaki, há 70 anos. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 209-218, ago. 2015. DOI 10.1590/s0103-40142015000200014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142015000200014>. Acesso em: 21 set. 2025.

OLIVEIRA, A. R. de. **Relatório Preliminar sobre o Acidente de Chernobyl**. IAEA, 1986.

OWEN, R. **The Litvinenko Inquiry**: report into the death of Alexander Litvinenko. Londres: Williams Lea, 2016. 328 p.

PAGANETTI, H. A review on lymphocyte radiosensitivity and its impact on radiotherapy. **Frontiers In Oncology**, [s. l.], v. 13, p. 1-19, 3 ago. 2023. DOI 10.3389/fonc.2023.1201500. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10435323/#s1>. Acesso em: 13 out. 2025.

PERNOT, E. *et al.* Ionizing radiation biomarkers for potential use in epidemiological studies. **Mutation Research/Reviews In Mutation Research**, [s. l.], v. 751, n. 2, p. 258-286, out. 2012. DOI 10.1016/j.mrrev.2012.05.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383574212000427#sec0010>. Acesso em: 13 out. 2025.

PHAM, T. N. *et al.* Beyond lymphopenia, unraveling radiation-induced leucocyte subpopulation kinetics and mechanisms through modeling approaches. **Journal Of Experimental & Clinical Cancer Research**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 1-18, 22 fev. 2023. DOI 10.1186/s13046-023-02621-4. Disponível em: <https://jeccr.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13046-023-02621-4#citeas>. Acesso em: 13 out. 2025.

RAMALHO, A. T.; NASCIMENTO, A. C. H.; NATARAJAN, A. T. Dose Assessments by Cytogenetic Analysis in the Goiania (Brazil) Radiation Accident. **Radiation Protection Dosimetry**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 97-100, nov. 1988.

RANA, S. *et al.* Radiation-induced biomarkers for the detection and assessment of absorbed radiation doses. **Journal Of Pharmacy And Bioallied Sciences**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 189, 2010. DOI 10.4103/0975-7406.68500. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3148623/#sec1-1>. Acesso em: 13 out. 2025.

ROGERS, C. **Radiation from Hiroshima and Nagasaki bombings**. 2024. Disponível em: <https://www.ebsco.com/research-starters/physics/radation-hiroshima-and-nagasaki-bombings#full-article>. Acesso em: 21 set. 2025.

SAMOYLOV, A. S. *et al.* Medical management: major lessons learned from the chernobyl accident (the review). **Journal Of Radiological Protection**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 51-60, 19 ago. 2021. DOI 10.1088/1361-6498/ac14d4.

SARTAYEV, Y. *et al.* The association between upper gastrointestinal endoscopic findings and internal radiation exposure in residents living in areas affected by the Chernobyl nuclear accident. **PLOS ONE**, 2022. DOI 10.1371/journal.pone.0278403. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0278403>. Acesso em: 20 set. 2025.

SCHUMANN, B.; BERWIG, J. A. O desastre radiológico do cézio 137: lições após 30 anos da sua ocorrência. **Direito, Estado e Sociedade**, Rio de Janeiro, v. 54, p. 262-286, jun. 2019.

SERRANO, C. **Hiroshima e Nagasaki: como foi o 'inferno' em que milhares morreram por causa das bombas atômicas**. BBC, 2025. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/resources/idt-897d70df-056b-413c-ac44-cdaca33bc8c>. Acesso em: 19 set. 2025.

SHEVCHENKO, V. A.; SNIGIRYOVA, G. **Cytogenetic effects of the action of ionizing radiation on human populations**. [S. l.: s. n.], p. 203-216, 1999.

SIMON, S. L. *et al.* Radiation doses and cancer risks in the Marshall Islands associated with exposure to radioactive fallout from Bikini and Enewetak nuclear weapons tests: summary.

Health Physics, v. 99, n. 2, p. 105-123, ago. 2010. DOI 10.1097/hp.0b013e3181dc523c. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4042840/>. Acesso em: 22 set. 2025.

SOMMER, S.; BURACZEWSKA, I.; KRUSZEWSKI, M. Micronucleus Assay: the state of art, and future directions. **International Journal Of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 1534, 24 fev. 2020. DOI 10.3390/ijms21041534. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7073234/>. Acesso em: 29 set. 2025.

SUTO, Y. *et al.* Biodosimetry of Restoration Workers for The Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. **Health Physics**, [s. l.], v. 105, n. 4, p. 366-373, out. 2013. DOI 10.1097/hp.0b013e3182995e42.

SUTO, Y. Review of Cytogenetic analysis of restoration workers for Fukushima Daiichi nuclear power station accident. **Radiation Protection Dosimetry**, [s. l.], v. 171, n. 1, p. 61-63, 29 jul. 2016. DOI 10.1093/rpd/ncw187.

TALAPKO, J. *et al.* Health Effects of Ionizing Radiation on the Human Body. **Medicina**, v. 60, 2024. DOI 10.3390/medicina60040653. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11052428/>. Acesso em: 21 set. 2025.

TAUHATA, L. *et al.* **Radioproteção e dosimetria**: fundamentos. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2013. 345 p.

TOMONAGA, M. The Atomic Bombings of Hiroshima and Nagasaki: a summary of the human consequences, 1945-2018, and lessons for homo sapiens to end the nuclear weapon age. **Journal For Peace And Nuclear Disarmament**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 491-517, 3 jul. 2019. DOI 10.1080/25751654.2019.1681226. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25751654.2019.1681226>. Acesso em: 25 set. 2025.

UNSCEAR. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. Nova Iorque: United Nations, 2008. 143 p.

UNSCEAR. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation**. Nova Iorque: United Nations, 2014. 311 p.

UOL. **Acidente com césio-137 em 1987 ocupou estádio da Copa América**. 2021. Disponível em: <https://www.uol.com.br/esporte/futebol/album/2021/06/23/acidente-com-cesio-137-em-1987-ocupou-estadio-da-copa-america.htm>. Acesso em: 25 set. 2025.

VASCONCELOS, C. M. L. de; GARCIA, E. A. C. **Biofísica para Biólogos**. São Cristóvão: Cesad, 2009.

VERHOEVEN, G. J. The reflection of two fields: electromagnetic radiation and its role in (aerial) imaging. **Aargnews**, [s. l.], v. 55, p. 13-18, out. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320616988_The_reflection_of_two_fields_-_Electromagnetic_radiation_and_its_role_in_aerial_imaging. Acesso em: 10 out. 2025.

VOROBIEV, A. I. Acute Radiation Disease and Biological Dosimetry in 1993. **Stem Cells**, [s. l.], v. 15, p. 269-274, 1997.

VRAL, A.; FENECH, M.; THIERENS, H. The micronucleus assay as a biological dosimeter of in vivo ionising radiation exposure. **Mutagenesis**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 11-17, 16 dez. 2011. DOI 10.1093/mutage/geq078.

WHO. **Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes**. Geneva: WHO, 2006. 160 p.

WHO. **Radiation and Health**. 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health>. Acesso em: 18 set. 2025.

WNA. **Chernobyl Accident 1986**. 2025. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident>. Acesso em: 22 set 2025.

XAVIER, A. M.; MORO, J. T.; HEILBRON, P. F. **Princípios básicos de segurança e proteção radiológica**. 3. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

YEUNG, A.W. K. The “as low as reasonably achievable” (ALARA) principle: a brief historical overview and a bibliometric analysis of the most cited publications.

Radioprotection, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 103-109, abr. 2019. DOI 10.1051/radiopro/2019017.

Disponível em:

https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/full_html/2019/02/radiopro190010/radiopro190010.html. Acesso em: 07 out. 2025.

YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. **Revista Brasileira de Física Médica**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 57-67, 2009.

ZATTAR, L.; VIANA, P. C. C.; CERRI, G. G. **Radiologia diagnóstica prática**. 2. ed. Barueri: Editora Manole, 2022.

**ANEXO A – TABELA DOS CRITÉRIOS DIAGNÓSTICOS DA SAR EM
DIFERENTES PERÍODOS DE SEU DESENVOLVIMENTO**

	Grau (gravidade) da SAR			
	1 (leve)	2 (moderado)	3 (grave)	4 (muito grave)
Faixa de dose absorvida (Gy)	1-2	2-4	4-6	6-10
Fase				
Prodrômica				
Vômito	em 2 horas ou mais tarde, único.	em 1-2 horas, recorrente.	em 30-60 min, múltiplos.	em 5-20 min, intratável.
Diarreia	Ausente	Ausente	Ausente ou provável	Provável
Dor de cabeça	De curto prazo	Moderada	Moderada	Intensiva
Lucidez	Lúcido	Lúcido	Lúcido	Confusão mental.
Temperatura corporal	Normal	Subfebril	Subfebril	Alta (38-39°C)
Pele e mucosas visíveis	Normal	Hiperemia transitória leve.	Hiperemia transitória moderada.	Hiperemia transitória aparente.
Duração	Algumas horas	Até 1 dia	Até 2 dias	Mais de 2-3 dias.
Fase Latente				
Linfócitos do sangue periférico do 3º ao 6º dia ($\times 10^9 \text{ l}^{-1}$).	1.0-0.6	0.5-0.3	0.2-0.1	≤ 0.1
Linfócitos do sangue periférico do 8º ao 9º dia ($\times 10^9 \text{ l}^{-1}$).	4.0-3.0	2.9-2.0	1.9-0.5	≤ 0.5

Grau (gravidade) da SAR				
	1 (leve)	2 (moderado)	3 (grave)	4 (muito grave)
Faixa de dose absorvida (Gy)	1-2	2-4	4-6	6-10
Diarréia a partir do 7º ao 9º dia.	Ausente	Ausente	Ausente	Evidente
Epilação, tempo de início.	Invisível	Pode ocorrer do 15º ao 20º dia.	Na maioria dos pacientes, do 10º ao 15º dia.	Na maioria dos pacientes, do 7º ao 10º dia.
Início da agranulocitose (granulócitos $\leq 1.0 \times 10^9 l^{-1}$).	Ausente ou inicia após o 30º dia.	20º-30º dia	8º-20º dia	6º-8º dia
Diminuição de plaquetas (abaixo de $40 \times 10^9 l^{-1}$).	Ausente ou inicia após o 25º-28º dia.	17º-24º dia	10º-16º dia	Antes do 10º dia.
Duração do período latente.	30 dias	15-25 dias	8-17 dias	Ausente ou $\leq 6-8$ dias.
Período de manifestação				
Síndromes clínicas	Astenia	Complicação infecciosa, diátese hemorrágica e epilação.	Complicação infecciosa, diátese hemorrágica e epilação.	Intoxicação, febre, síndrome gastrointestinal e hipotonia.
Contagem de leucócitos ($\times 10^9 l^{-1}$).	3.0-1.5	1.5-0.5	0.5-0.1	$< 0,5$ ou o paciente morre antes.
Contagem de plaquetas ($\times 10^9 l^{-1}$).	100-60	50-30	< 30	< 20 ou o paciente morre antes.
Velocidade de hemossedimentação ($mm h^{-1}$)	10-25	25-40	40-80	60-80

Fonte: Modificado de Belyi; Kovalenko; Bazyka, 2013