

Alterações citogenéticas associadas à exposição ocupacional à radiação ionizante em técnicos de radiologia: uma revisão sistemática

Guilherme Silva de Souza¹  Gabriel Rodrigues Brito¹  Matheus de Lima Botelho¹  Denner Luiz Cordeiro de Souza² 
Maykon Jhuly Martins de Paiva^{1,3}  Mateus Silva Santos^{1,3}  Rafaela de Carvalho Alves⁴ 

¹Universidade de Gurupi – UnirG. Paraíso do Tocantins/TO, Brasil.

²Hospital Regional Tapajós – HRT. Itaituba/PA, Brasil.

³Universidade Luterana do Brasil/Centro Universitário Luterano de Palmas – ULBRA/CEULP. Palmas/TO, Brasil.

⁴Universidade de Gurupi – UnirG. Gurupi/TO, Brasil.

E-mail: guilhermesilvaitb2018@gmail.com

Highlights

• A exposição crônica a baixas doses de radiação ionizante está associada à instabilidade genômica mensurável em profissionais da radiologia.

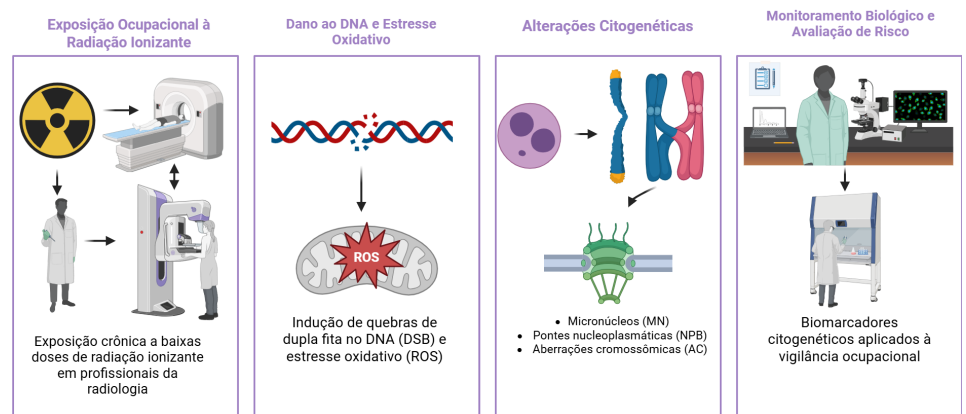
• Fatores individuais e ocupacionais, como idade, sexo, tabagismo, tempo de serviço e setor de atuação, podem influenciar a magnitude do dano citogenético.

• O monitoramento citogenético periódico pode complementar a dosimetria individual na vigilância ocupacional e na prevenção de efeitos tardios da radiação.

• Micronúcleos, pontes nucleoplasmáticas, brotos nucleares, dicêntricos e aberrações cromossômicas estruturais foram os biomarcadores mais frequentemente avaliados.

• Sistemas radiológicos digitais estiveram associados a menor intensidade de dano genotóxico quando comparados a sistemas analógicos e de radiologia computadorizada.

Resumo Gráfico



Resumo

A exposição ocupacional à radiação ionizante representa risco relevante para técnicos de radiologia e trabalhadores de serviços radiológicos, podendo induzir danos citogenéticos mensuráveis mesmo em cenários de baixa dose. O objetivo deste estudo foi sintetizar evidências recentes sobre alterações citogenéticas associadas à exposição ocupacional à radiação ionizante em profissionais da radiologia, identificando os biomarcadores mais frequentemente alterados e sua relação com dosimetria, setor de atuação e características individuais. Trata-se de uma revisão sistemática conduzida conforme as diretrizes PRISMA 2020. Foram incluídos estudos observacionais com dados primários em humanos, grupo controle não exposto e avaliação quantitativa de biomarcadores citogenéticos. Cinco estudos publicados entre 2021 e 2025, envolvendo mais de 2.600 participantes, preencheram os critérios de elegibilidade. Os estudos incluídos relataram maior frequência de dano citogenético em trabalhadores expostos quando comparados aos controles, com destaque para micronúcleos, pontes nucleoplasmáticas, brotos nucleares, dicêntricos e aberrações cromossômicas estruturais. A magnitude dos achados variou conforme o biomarcador utilizado, o tipo de tecnologia radiológica, o setor ocupacional e fatores de confusão, como idade, sexo e tabagismo. A correlação entre dosimetria individual e dano biológico foi heterogênea. Conclui-se que profissionais da radiologia ocupacionalmente expostos constituem grupo relevante para vigilância citogenética, e que a biodosimetria pode complementar a dosimetria física em programas de monitoramento ocupacional.

Palavras-chave: Exposição à Radiação. Citogenética. Biomarcadores. Instabilidade Genômica.

Editor de área: Edison Barbieri
Mundo Saúde. 2026,50:e19452025
O Mundo da Saúde, São Paulo, SP, Brasil.
<https://revistamundodasaude.emnuvens.com.br>

Recebido: 20 dezembro 2025.

Aceito: 13 maio 2026.

Publicado: 01 junho 2026.

INTRODUÇÃO

A exposição ocupacional à radiação ionizante constitui um dos principais riscos físicos enfrentados por técnicos de radiologia e trabalhadores de serviços radiológicos^{1,2,3}. Mesmo com os avanços tecnológicos, a ampliação de sistemas digitais e o aprimoramento das normas de radioproteção, profissionais que atuam em radiodiagnóstico, tomografia computadorizada, radioterapia, hemodinâmica e medicina nuclear podem permanecer sujeitos a exposições crônicas, intermitentes e cumulativas, capazes de produzir danos moleculares, celulares e cromossômicos^{4,5}.

Os linfócitos do sangue periférico são amplamente utilizados em biodosimetria citogenética devido à sua elevada radiosensibilidade, facilidade de obtenção e capacidade de refletir danos cromossômicos induzidos por radiação ionizante. Embora a Lei de Bergonié e Tribondeau estabeleça que células menos diferenciadas, com alta atividade mitótica e maior potencial proliferativo tendem a ser mais radiosensíveis, os linfócitos representam uma exceção relevante, pois, mesmo sendo células diferenciadas e predominantemente em fase G0, apresentam alta susceptibilidade a quebras cromossômicas induzidas pela radiação. Além disso, sua persistência no sangue periférico permite identificar alterações citogenéticas decorrentes de exposições recentes ou acumuladas, justificando o uso de micronúcleos, pontes nucleoplasmáticas, dicêntricos e aberrações cromossômicas como biomarcadores de instabilidade genômica em populações ocupacionalmente expostas^{5,6,7}.

A exposição ocupacional à radiação ionizante é monitorada por meio da dosimetria individual, sendo a dose efetiva de corpo inteiro uma das principais grandezas utilizadas para estimar o risco radiológico global. Segundo a International Commission on Radiological Protection, o limite ocupacional de dose efetiva é de 20 mSv ao ano, em média, ao longo de cinco anos, não devendo ultrapassar 50 mSv em qualquer ano isolado⁸. No Brasil, a Norma ANSN 3.01 estabelece requisitos de radioproteção e segurança radiológica, incluindo níveis de registro e investigação para monitoração individual de indivíduos ocupacionalmente expostos; entre eles, dose efetiva de 6 mSv em um ano ou 1 mSv em um mês como nível de investigação⁹.

Exames laboratoriais convencionais, como o hemograma, podem auxiliar a vigilância clínica de trabalhadores expostos, especialmente diante de exposições elevadas ou suspeita de efeitos hematológicos. Entretanto, apresentam baixa sensibilidade para detectar precocemente danos genéticos decorrentes de exposição crônica a baixas doses. Evidências nacionais, como a avaliação de trabalhadores

hospitalares expostos a raios X, não demonstraram associação consistente entre dose ocupacional e alterações hematológicas em leucócitos e plaquetas¹⁰. Assim, biomarcadores citogenéticos podem complementar a dosimetria física ao identificar instabilidade genômica antes do aparecimento de alterações clínicas evidentes.

Os efeitos biológicos da radiação ionizante podem ser classificados em determinísticos e estocásticos. Os efeitos determinísticos apresentam limiar de dose e gravidade proporcional à dose recebida, manifestando-se principalmente após exposições elevadas, como eritema, lesão tecidual e síndrome aguda da radiação. Em contraste, os efeitos estocásticos não apresentam limiar definido, sendo caracterizados por aumento probabilístico do risco conforme a dose acumulada, especialmente em relação à carcinogênese e a possíveis efeitos hereditários. No contexto ocupacional, em que predomina exposição crônica a baixas doses, a principal preocupação recai sobre os efeitos estocásticos, justificando a adoção contínua de medidas de radioproteção e biomonitoramento^{8,9}.

O ensaio de micronúcleos tem sido utilizado como ferramenta para o acompanhamento da saúde de trabalhadores expostos à radiação. Contudo, a frequência de micronúcleos pode sofrer influência de fatores como sexo, idade, hábitos de vida, condições metabólicas, tabagismo e exposição a agentes clastogênicos e aneugênicos^{11,12,13,14,15}. Por esse motivo, o micronúcleo não é um biomarcador específico de radiação ionizante em baixas doses. Em contrapartida, cromossomos dicêntricos e anéis cêntricos apresentam maior especificidade para exposição à radiação, sendo considerados padrão-ouro na estimativa de dose após exposição acidental, enquanto pontes nucleoplasmáticas vêm sendo discutidas como marcadores promissores para cenários de exposição crônica e de baixa dose^{6,7,16}.

A prática radiológica atual adota medidas de radioproteção baseadas nos princípios de justificação, otimização e limitação de dose, incluindo o princípio ALARA, redução do tempo de exposição, aumento da distância em relação à fonte e uso de blindagens coletivas e individuais. Entretanto, essas medidas não eliminam integralmente o risco estocástico. Entre os limitantes para sua correta condução estão baixa percepção de risco, uso irregular de vestimentas plumbíferas por desconforto e peso, sobrecarga de trabalho, supervisão técnica insuficiente, equipamentos obsoletos e possível subestimação da resposta biológica individual pela dosimetria física convencional^{9,17}.

Nesse cenário, a avaliação citogenética não deve substituir a dosimetria individual, mas pode atuar como ferramenta complementar para vigilância ocu-

pacional, investigação de exposição crônica e revisão de práticas laborais. Estudos recentes demonstram diferenças entre setores ocupacionais: Farkas et al. observaram doses efetivas médias de 1,26 mSv em Medicina Nuclear, 0,08 mSv em radioterapia, 0,07 mSv em raio-X diagnóstico e 0,02 mSv em tomografia computadorizada, com maior frequência de aberrações totais e células aberrantes no grupo de Medicina Nuclear quando comparado ao grupo de tomografia computadorizada⁵.

Assim, esta revisão sistemática tem como objetivo

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta revisão sistemática foi conduzida de acordo com as diretrizes PRISMA 2020, que orientaram as etapas de formulação da pergunta, busca bibliográfica, elegibilidade, seleção, extração e síntese dos dados. Não foi realizada meta-análise devido à heterogeneidade dos estudos quanto aos biomarcadores avaliados, unidades de medida, delineamentos, perfis ocupacionais e formas de mensuração da exposição. Assim, optou-se por síntese narrativa dos resultados. Ferramentas de inteligência artificial foram utilizadas apenas para apoio linguístico e melhoria de clareza textual, sem participação na seleção dos estudos, extração dos dados, análise crítica ou interpretação científica.

Pergunta de pesquisa (PICO)

A pergunta de pesquisa foi construída por meio da estratégia PICO. A população (P) foi definida como técnicos de radiologia e trabalhadores de serviços radiológicos ocupacionalmente expostos à radiação ionizante; a exposição (I) correspondeu à exposição crônica ou intermitente à radiação ionizante em ambiente ocupacional; a comparação (C) correspondeu a indivíduos não expostos ou com exposição mínima; e o desfecho (O) consistiu em alterações citogenéticas avaliadas por micronúcleos, pontes nucleoplasmáticas, brotos nucleares, dicêntricos, aberrações cromossômicas e outros marcadores genotóxicos. Dessa forma, a pergunta central foi: quais alterações citogenéticas são observadas em profissionais da radiologia ocupacionalmente expostos à radiação ionizante, em comparação a indivíduos não expostos?

Estratégia de busca

A busca bibliográfica foi realizada nas bases PubMed/MEDLINE, *Scopus*, *ScienceDirect* e *Google Scholar* no período de 10 a 28 de novembro de 2025. Foram considerados estudos publicados entre janeiro de 2021 e novembro de 2025, nos idiomas português e inglês, incluindo exclusivamente artigos científicos originais com dados primários em humanos. A estratégia

sintetizar evidências provenientes de estudos observacionais que avaliam, por meio de biomarcadores citogenéticos em linfócitos do sangue periférico, as alterações associadas à exposição ocupacional à radiação ionizante em técnicos de radiologia e trabalhadores de serviços radiológicos. Busca-se, ainda, identificar os tipos de danos cromossômicos mais prevalentes, como micronúcleos, pontes nucleoplasmáticas, brotos nucleares, dicêntricos e aberrações cromossômicas, bem como comparar esses achados com grupos não expostos.

de busca foi estruturada conforme recomendações de transparência do PRISMA 2020 e do PRISMA-S, priorizando reprodutibilidade e descrição explícita dos termos, operadores booleanos e bases consultadas^{18,19}.

No PubMed/MEDLINE, foi utilizada a seguinte estratégia: (“Radiation, Ionizing”[MeSH Terms] OR “ionizing radiation” OR “radiation exposure”) AND (“Occupational Exposure”[MeSH Terms] OR occupational OR “radiology workers” OR “radiology technicians” OR “medical radiation professionals”) AND (“Chromosome Aberrations”[MeSH Terms] OR cytogenetic OR micronucleus OR micronuclei OR “nucleoplasmic bridges” OR dicentric OR “comet assay”). Estratégias equivalentes foram adaptadas para *Scopus* e *ScienceDirect*. No *Google Scholar*, a busca foi utilizada de forma complementar, com análise dos primeiros 100 resultados ordenados por relevância.

A delimitação temporal entre 2021 e 2025 foi adotada para priorizar estudos conduzidos em contexto tecnológico e regulatório mais próximo da prática radiológica atual, marcada pela ampliação de sistemas digitais, maior disponibilidade de dosimetria individual e atualização das recomendações de radioproteção. Reconhece-se, entretanto, que esse recorte pode excluir estudos clássicos relevantes sobre biomonitoramento citogenético. Por esse motivo, estudos anteriores ao período definido foram utilizados como fundamentação teórica na introdução e discussão, mas não compuseram a síntese sistemática principal.

Crítérios de inclusão

Foram incluídos estudos observacionais, transversais, caso-controle ou coortes, que investigaram alterações citogenéticas em técnicos de radiologia ou trabalhadores de serviços radiológicos ocupacionalmente expostos à radiação ionizante, com comparação com grupo controle não exposto ou minimamente exposto. Apenas estudos com dados primários, conduzidos em humanos e que reportavam resultados citogenéticos quantitativos foram considerados elegíveis.

Critérios de exclusão

Foram excluídos artigos experimentais *in vitro* ou com animais, revisões narrativas, revisões sistemáticas, relatos de caso, séries de casos, estudos sem grupo controle, publicações sem texto completo disponível, estudos cuja população estivesse exposta simultaneamente a outros agentes genotóxicos sem separação dos resultados e estudos que não apresentassem biomarcadores citogenéticos quantitativos.

Seleção dos estudos

A seleção foi realizada em três etapas: triagem de títulos, triagem de resumos e leitura completa dos textos. Cada etapa foi conduzida de forma independente por dois pesquisadores, que aplicaram os critérios de elegibilidade previamente definidos. Divergências foram resolvidas por consenso e, quando necessário, por um terceiro pesquisador. O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos é apresentado no fluxograma PRISMA correspondente.

Extração dos dados

A extração de dados foi realizada por meio de planilha padronizada contendo: autores, ano de publicação, país/local, delineamento, tamanho da amostra dos grupos exposto e controle, setor ou tecnologia radiológica, tempo de exposição ocupacional, dose efetiva ou método de monitoração, biomarcadores citogenéticos avaliados, valores quantitativos dos desfechos, medidas de associação, valores de *p*, intervalos de confiança quando disponíveis, fatores de confusão analisados e principais conclusões.

Avaliação da qualidade metodológica

A qualidade metodológica dos estudos incluídos foi avaliada independentemente por dois pesquisadores, considerando clareza na definição da população exposta e controle, adequação da mensuração da exposição ocupacional, descrição dos biomarcadores citogenéticos, controle de fatores de confusão, adequação da análise estatística e completude da apresentação dos resultados. Os principais riscos de viés considerados foram seleção inadequada do grupo controle, ausência de ajuste para idade, sexo, tabagismo e tempo de serviço, heterogeneidade das técnicas citogenéticas e ausência de padronização na mensuração da dose ocupacional.

Síntese dos resultados

Devido à heterogeneidade metodológica entre os estudos, especialmente quanto às técnicas citogenéticas utilizadas, tempos de exposição, setores ocupacionais, tecnologias radiológicas e unidades de mensuração da exposição, os resultados foram sintetizados de forma narrativa. Foram extraídos valores quantitativos dos principais biomarcadores, incluindo médias, desvios-padrão, medianas, frequências, diferenças entre grupos, valores de *p*, intervalos de confiança de 95% e coeficientes de correlação, quando reportados pelos estudos originais. Quando essas medidas não estavam disponíveis, os resultados foram descritos como “não reportados”. Não foi realizado recálculo de poder estatístico devido à ausência de dados homogêneos suficientes para estimativas comparáveis entre os estudos.

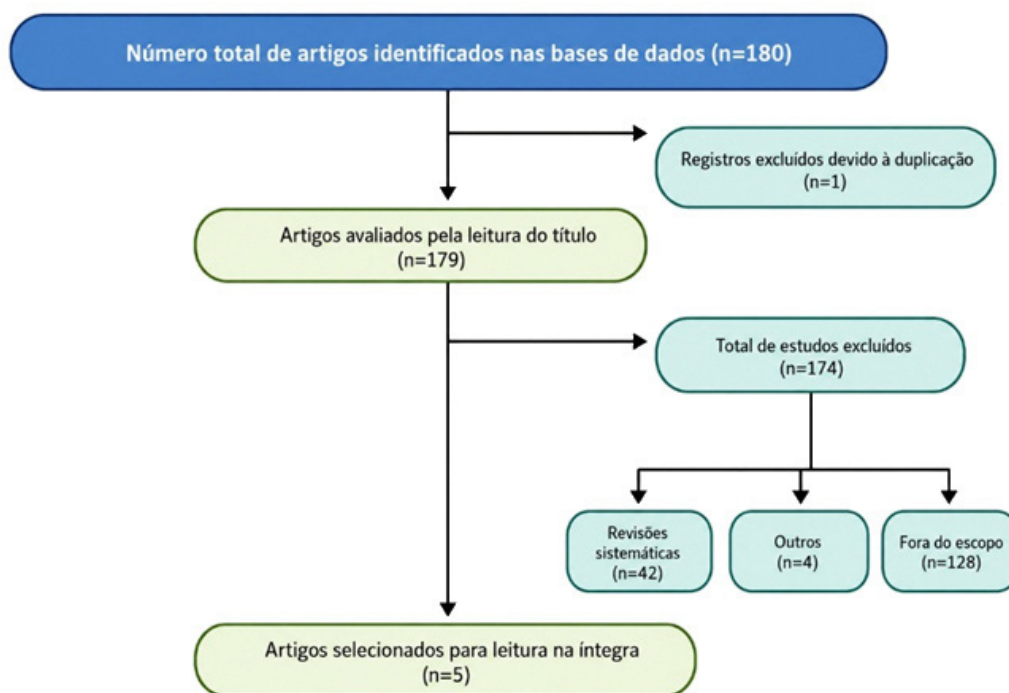


Figura 1 - Fluxograma da metodologia de seleção de artigos.

Tabela 1 - Características metodológicas, parâmetros de exposição, biomarcadores e principais achados quantitativos dos estudos incluídos na revisão sistemática (2021-2025).

Autor/ano	Local/delineamento	Amostra	Dose/exposição	Biomarcadores e resultados quantitativos	Confundidores/limitações
Cunha Jr <i>et al.</i> (2021) ²⁰	Brasil; estudo transversal	113 participantes: 70 expostos e 43 controles	Exposição ocupacional em departamentos de radiologia com filme analógico (AF), radiologia computadorizada (CR) e radiologia digital (DR); doses anuais abaixo do limite legal reportado no estudo	Micronúcleos: AF 1,96 ± 0,21 vs. 1,20 ± 0,25; CR 1,89 ± 0,15 vs. 1,31 ± 0,36; DR 1,75 ± 0,11 vs. 1,59 ± 0,32. O dano foi maior nos sistemas analógicos e menor nos sistemas digitais.	Comparação por tecnologia radiológica; limitações: delineamento transversal e possível influência de tempo de serviço e características individuais.
Çobanoğlu e Çayır (2024) ¹⁷	Turquia; estudo transversal	76 participantes: 40 expostos e 36 controles	Dosímetros pessoais avaliados periodicamente; tempo médio de trabalho de 11,59 anos; setores incluindo raio-X, TC, RM, mamografia e medicina nuclear	CBMN: aumento significativo de NPB, NBUD, MN e dano total ao DNA nos expostos ($p < 0,0001$ para todas as medidas). Leituras dos dosímetros correlacionaram-se positivamente com NPB e NBUD.	Variáveis ocupacionais, como horas totais de trabalho, duração média de trabalho e tempo em radiografia projetiva, correlacionaram-se com MN e TDD.
Farkas <i>et al.</i> (2022) ²¹	Hungria; coorte retrospectiva e análise citogenética transversal	1.240 participantes: 264 expostos à radiação, 188 a citostáticos, 63 a laboratório químico e 725 controles	Monitoramento ocupacional por dosimetria pessoal; baixa dose ocupacional em serviços de radioterapia e diagnóstico	Aberrações cromossômicas totais foram maiores em trabalhadores expostos à radiação; não houve diferença consistente para dicêntricos entre todos os subgrupos.	Tabagismo foi frequente e relevante como fator de confusão; diferenças entre exposições ocupacionais dificultam comparação direta.
Tian <i>et al.</i> (2021) ⁷	China; estudo transversal	Dicêntricos: 199 expostos/78 controles; MN/NPB: 205 expostos/100 controles	Dose efetiva anual média de 0,68 mSv; setores: radiodiagnóstico, radioterapia, medicina nuclear e intervencionista	Dicêntricos + anéis: 0,29 ± 0,03 por 100 metáfases nos expostos; NPB: 1,04 ± 0,03 por 1.000 células binucleadas; MN: 19,52 ± 0,15 por 1.000 células binucleadas. Todos foram maiores nos expostos ($p < 0,001$).	NPB foi influenciado por tipo de trabalho e tempo de serviço; MN também por sexo e idade, sendo menos específico para radiação.
Farkas <i>et al.</i> (2025) ⁵	Hungria; citogenética transversal com seguimento retrospectivo de câncer	1.033 participantes: 301 trabalhadores com radiação ionizante e 732 controles	Doses efetivas médias: medicina nuclear 1,26 ± 2,52 mSv; radioterapia 0,08 ± 0,20 mSv; raio-X 0,07 ± 0,17 mSv; TC 0,02 ± 0,06 mSv	Aberrações cromatídicas e cromossômicas foram significativamente maiores no grupo exposto. Medicina nuclear apresentou mais aberrações totais ($p = 0,025$) e células aberrantes ($p = 0,032$) que TC. Não houve maior frequência de tumores no grupo exposto.	Tabagismo elevou a frequência de aberrações e câncer; não houve correlação linear consistente entre dosimetria e aberrações cromossômicas.

Nota: MN: micronúcleos; NPB: pontes nucleoplasmáticas; NBUD: brotos nucleares; CBMN: ensaio de micronúcleos com bloqueio da citocinese; TDD: dano total ao DNA; TC: tomografia computadorizada; RM: ressonância magnética; AF: filme analógico; CR: radiologia computadorizada; DR: radiologia digital; TLD: dosímetro termoluminescente. As comparações foram realizadas de forma qualitativa devido à heterogeneidade dos biomarcadores, unidades de medida, setores ocupacionais e formas de mensuração da exposição.

RESULTADOS

Foram incluídos cinco estudos observacionais, com amostras variando de 76 a 1.240 participantes por estudo, compostas por trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação ionizante e respectivos grupos controle em proporções variáveis. De modo geral, os estudos identificaram maior frequência de biomarcadores citogenéticos nos profissionais expostos, embora a magnitude do efeito tenha variado conforme biomarcador, setor ocupacional, tecnologia radiológica e controle de fatores de confusão^{5,7,17,20,21}.

No estudo de Cunha Jr *et al.*²⁰, os trabalhadores expostos a sistemas analógicos apresentaram fre-

quência média de micronúcleos de 1,96 ± 0,21, em comparação a 1,20 ± 0,25 nos controles. Nos sistemas de radiologia computadorizada, os valores foram 1,89 ± 0,15 versus 1,31 ± 0,36; e nos sistemas digitais, 1,75 ± 0,11 versus 1,59 ± 0,32. Esses dados indicam maior dano genotóxico nos sistemas analógicos, seguido pelos sistemas computadorizados, com menor magnitude nos sistemas digitais.

Tian *et al.*⁷ observaram aumento significativo de diferentes marcadores citogenéticos em profissionais da radiação. A frequência global de cromossomos dicêntricos e anéis foi de 0,29 ± 0,03 por 100 metáfases nos profissionais expostos, enquan-

to as frequências de pontes nucleoplasmáticas e micronúcleos foram, respectivamente, $1,04 \pm 0,03$ e $19,52 \pm 0,15$ por 1.000 células binucleadas. Os três marcadores foram significativamente superiores aos controles ($p < 0,001$), reforçando que NPB e dicêntricos podem ser mais informativos que micronúcleos isolados em cenários de baixa dose.

Çobanoğlu e Çayır¹⁷ identificaram aumento significativo de micronúcleos, pontes nucleoplasmáticas, brotos nucleares e dano total ao DNA nos trabalhadores da radiologia em comparação aos controles, com $p < 0,0001$ para todas as medidas. Além disso, as leituras dos dosímetros apresentaram correlação positiva com NPB e NBUD, enquanto variáveis ocupacionais, como horas totais de trabalho, duração média do trabalho e tempo em radiografia projetiva, correlacionaram-se com MN e TDD.

Farkas *et al.*⁵ avaliaram 301 trabalhadores expostos à radiação ionizante e 732 controles, observando frequências significativamente maiores de aberrações cromatídicas e cromossômicas no grupo exposto. A análise por setor demonstrou maior dose efetiva média na Medicina Nuclear ($1,26 \pm 2,52$ mSv) em comparação à radioterapia ($0,08 \pm 0,20$ mSv), raio-X diagnóstico ($0,07 \pm 0,17$ mSv) e tomografia computadorizada ($0,02 \pm 0,06$ mSv). O grupo da Medicina Nuclear apresentou maior fre-

quência de aberrações totais ($p = 0,025$) e células aberrantes ($p = 0,032$) quando comparado ao grupo da tomografia computadorizada.

Observou-se heterogeneidade relevante na associação entre dosimetria física e dano biológico. Em alguns estudos, as leituras dos dosímetros individuais correlacionaram-se positivamente com biomarcadores como NPB e NBUD¹⁷. Entretanto, outras investigações não detectaram relação linear entre a dose efetiva estimada pela dosimetria individual e a magnitude das aberrações cromossômicas observadas⁵. Essa divergência sugere que a dosimetria física, embora essencial para controle ocupacional, pode não refletir integralmente a resposta biológica individual em cenários de exposição crônica a baixas doses.

A análise estatística dos estudos incluídos baseou-se predominantemente em comparações entre grupos por valores de p e, em menor frequência, em correlações ou modelos multivariáveis. A ausência de intervalos de confiança e de estimativas padronizadas de tamanho de efeito em parte dos artigos limitou a comparação quantitativa direta. Por esse motivo, os resultados foram interpretados considerando conjuntamente significância estatística, tamanho amostral, magnitude absoluta dos biomarcadores e fatores de confusão reportados.

DISCUSSÃO

Os resultados desta revisão demonstram que a exposição ocupacional prolongada à radiação ionizante está associada a instabilidade genômica mensurável em técnicos de radiologia e trabalhadores de serviços radiológicos, mesmo quando as doses registradas permanecem dentro dos limites regulatórios. Esses achados corroboram evidências que reconhecem a radiação ionizante como agente clastogênico capaz de induzir quebras cromossômicas, erros mitóticos, rearranjos estruturais e danos persistentes ao DNA^{5,7,17,20,21}.

A interpretação dos achados deve considerar que os biomarcadores citogenéticos avaliados não possuem a mesma especificidade biológica. O ensaio de micronúcleos é amplamente utilizado por ser relativamente simples, reproduzível e aplicável ao biomonitoramento populacional, mas sua frequência basal pode ser influenciada por idade, sexo, tabagismo, doenças metabólicas, inflamação e exposição a outros agentes genotóxicos^{11,12,13,14,15}. Por outro lado, cromossomos dicêntricos e anéis apresentam maior especificidade para exposição à radiação ionizante, embora sejam mais úteis em exposições agudas ou recentes. As pontes nucleoplasmáticas têm sido apontadas como marcadores promissores em contextos de exposição crônica a

baixas doses, pois podem refletir eventos de quebra-fusão-ponte e apresentam menor frequência basal que os micronúcleos^{6,7}.

As diferenças entre ambientes ocupacionais ajudam a explicar a heterogeneidade dos resultados. Profissionais da Medicina Nuclear podem apresentar maior risco de exposição interna e externa devido à manipulação de radiofármacos e fontes não seladas, enquanto trabalhadores de radiodiagnóstico convencional e tomografia tendem a se expor predominantemente a fontes externas, geralmente com maior controle por barreiras físicas, distância e tempo de exposição. Isso pode justificar a maior frequência de aberrações observada em subgrupos da Medicina Nuclear em comparação a setores como raio-X convencional e tomografia computadorizada⁵.

A tecnologia radiológica utilizada também parece influenciar a magnitude do dano citogenético. O estudo de Cunha Jr *et al.*²⁰ demonstrou maior frequência de micronúcleos em profissionais expostos a sistemas analógicos e de radiologia computadorizada quando comparados a sistemas digitais. Essa diferença é biologicamente plausível, uma vez que sistemas digitais tendem a permitir maior otimização da dose, melhor controle operacional e menor repetição de exames, embora tais benefícios

dependam de calibração adequada, treinamento e adesão às normas de radioproteção.

Outro ponto crítico é o controle incompleto de fatores de confusão. Idade e sexo podem influenciar a frequência basal de micronúcleos; o tabagismo pode aumentar aberrações cromossômicas e dano oxidativo; e o tempo de serviço pode refletir tanto exposição acumulada quanto mudanças tecnológicas ao longo da carreira. Estudos que não ajustam adequadamente esses fatores podem superestimar ou subestimar a associação entre radiação ocupacional e dano citogenético. Essa limitação reforça a necessidade de interpretar os achados com cautela e de priorizar estudos com grupos controle bem pareados e análise multivariada^{5,7,17}.

A ausência de correlação consistente entre dosimetria individual e dano biológico não invalida o uso dos dosímetros, mas evidencia que a dose registrada pode não traduzir integralmente a resposta biológica individual. A radiosensibilidade, a eficiência dos mecanismos de reparo do DNA, o uso real de equipamentos de proteção, a posição do dosímetro, exposições parciais do corpo e características do setor de trabalho podem modificar a relação entre exposição física e dano citogenético observado. Portanto, a biodosimetria deve ser

CONCLUSÃO

Com base nos estudos incluídos nesta revisão sistemática, profissionais da radiologia ocupacionalmente expostos à radiação ionizante apresentaram maior frequência de biomarcadores citogenéticos, como micronúcleos, pontes nucleoplasmáticas, brotos nucleares, dicêntricos e aberrações cromossômicas, quando comparados a indivíduos não expostos. Esses achados sugerem instabilidade genômica associada à exposição ocupacional crônica, mesmo em cenários de baixa dose e dentro dos limites regulamentares.

A interpretação desses resultados deve considerar

compreendida como complemento, e não substituído, da dosimetria física^{5,6,8,9,17,22}.

Do ponto de vista da vigilância ocupacional, os achados sugerem que a avaliação citogenética pode atuar como ferramenta complementar em situações específicas, como exposição crônica, suspeita de subestimação dos dosímetros, uso inadequado de equipamentos de proteção, trabalho em setores de maior risco, equipamentos obsoletos ou presença de alterações persistentes em biomarcadores. A incorporação desses testes, entretanto, deve considerar custo, padronização laboratorial, periodicidade, interpretação clínica e necessidade de protocolos institucionais claros^{6,8,9,16,22,23}.

Entre as limitações desta revisão, destacam-se o número reduzido de estudos incluídos, o recorte temporal restrito a 2021-2025, o predomínio de delineamentos transversais, a heterogeneidade dos biomarcadores avaliados e a ausência de dados suficientes para metanálise. Além disso, parte dos estudos não apresentou intervalos de confiança, tamanho de efeito ou ajuste estatístico completo para fatores de confusão. Apesar dessas limitações, a seleção de estudos recentes permitiu discutir achados produzidos em contexto tecnológico mais próximo da prática radiológica atual.

a heterogeneidade metodológica entre os estudos, incluindo diferenças nas técnicas citogenéticas, nos setores ocupacionais, nas tecnologias radiológicas, nas formas de mensuração da exposição e no controle de fatores de confusão. A relação entre dosimetria individual e dano biológico não foi consistente, reforçando que a biodosimetria pode complementar, mas não substituir, a dosimetria física. Estudos futuros devem priorizar delineamentos longitudinais, amostras maiores, controle estatístico de confundidores, apresentação de intervalos de confiança e padronização dos biomarcadores utilizados.

Financiamento

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Tocantins (FAPT) pelo apoio por meio de auxílio à pesquisa que tornou possível a realização deste trabalho.

Declaração do autor CRediT

Conceituação: Santos, MS; Paiva, MJM; Souza, DLC. Metodologia: Brito, GR; Souza, GS; Alves, RC. Validação: Paiva, MJM; Santos, MS. Análise estatística: Paiva, MJM; Botelho, ML. Análise formal: Santos, MS; Souza, DLC. Investigação: Botelho, ML. Recursos: Souza, GS; Souza, DLC. Elaboração de rascunho original: Brito, GR. Redação-revisão e edição: Souza, GS; Paiva, MJM. Visualização: Alves, RC; Botelho, ML. Supervisão: Maykon Jhuly Martins de Paiva, Alves, RC. Administração do projeto: Souza, GS.

Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Declaração de conflito de interesse

Os autores declaram que não têm interesses financeiros concorrentes ou relações pessoais conhecidas que possam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

REFERÊNCIAS

1. Tang FR, Loganovsky K. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human. *J Environ Radioact.* 2018;192:32-47. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.05.018.
2. Ballardín M, Antonelli A, Cipollini M, Fallahi P, Scarpato R, Tomei A, et al. Induction of chromatid-type aberrations in peripheral lymphocytes of hospital workers exposed to very low doses of radiation. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2007;626(1-2):61-68.
3. Seo S, Lim WY, Lee DN, Kim JU, Cha ES, Bang YJ, et al. Assessing the health effects associated with occupational radiation exposure in Korean radiation workers: protocol for a prospective cohort study. *BMJ Open.* 2018;8:e017359. doi:10.1136/bmjopen-2017-017359.
4. Bernier MO, Doody MM, Van Dyke ME, Villoing D, Alexander BH, Linet MS, et al. Work history and radioprotection practices in relation to cancer incidence and mortality in US radiologic technologists performing nuclear medicine procedures. *Occup Environ Med.* 2018;75(8):533-541. doi:10.1136/oemed-2017-104857.
5. Farkas G, Király R, Székely G, Kocsis ZS, Sándor GO, Pesznyák C, et al. A study of radiation workers: dosimetry, chromosomal aberrations, and cancer risk. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2025;904:503869. doi:10.1016/j.mrgentox.2025.503869.
6. Vral A, Fenech M, Thierens H. The micronucleus assay as a biological dosimeter of in vivo ionising radiation exposure. *Mutagenesis.* 2011;26(1):11-17. doi:10.1093/mutage/geq078.
7. Tian XL, Lu X, Cai TJ, Lyu YM, Tian M, Liu QJ. Cytogenetic monitoring of peripheral blood lymphocytes from medical radiation professionals occupationally exposed to low-dose ionizing radiation. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2021;867:503370. doi:10.1016/j.mrgentox.2021.503370.
8. International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP.* 2007;37(2-4):1-332.
9. Brasil. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear. Norma ANSN 3.01: requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação. Brasília: ANSN; 2025.
10. Lykawka R. Avaliação da relação entre a dose individual dos trabalhadores ocupacionalmente expostos a raios X em ambiente hospitalar e seus exames de hemograma para contagem de leucócitos e plaquetas [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2021.
11. Nefic H, Handzic I. The effect of age, sex, and lifestyle factors on micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes of the Bosnian population. *Mutat Res.* 2013;753(1):1-11. doi:10.1016/j.mrgentox.2013.03.001.
12. Cai TJ, Lu X, Tian XL, Zhao H, Li S, Feng JB, et al. Effects of age and gender on the baseline and 2 Gy ⁶⁰Co gamma-ray-induced nucleoplasmic bridge frequencies in peripheral blood lymphocytes of Chinese population. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2018;832-833:29-34. doi:10.1016/j.mrgentox.2018.06.013.
13. Santovito A, Gendusa C. Micronuclei frequency in peripheral blood lymphocytes of healthy subjects living in Turin (North Italy): contribution of body mass index, age and sex. *Ann Hum Biol.* 2020;47(1):48-54. doi:10.1080/03014460.2020.1714728.
14. Walker VE, Degner A, Carter EW, Nicklas JA, Walker DM, Tretyakova N, et al. 1,3-Butadiene metabolite 1,2,3,4-diepoxybutane induces DNA adducts and micronuclei but not t(9;22) translocations in human cells. *Chem Biol Interact.* 2019;312:108797. doi:10.1016/j.cbi.2019.108797.
15. Franzke B, Schwingshackl L, Wagner KH. Chromosomal damage measured by the cytokinesis-block micronucleus cytome assay in diabetes and obesity: a systematic review and meta-analysis. *Mutat Res Rev Mutat Res.* 2020;786:108343. doi:10.1016/j.mrrev.2020.108343.
16. Carrano AV, Natarajan AT. Considerations for population monitoring using cytogenetic techniques. *Mutat Res.* 1988;204(3):379-406. doi:10.1016/0165-1218(88)90036-5.
17. Çobanoğlu H, Çayır A. Occupational exposure to radiation among health workers: genome integrity and predictors of exposure. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2024;893:503726. doi:10.1016/j.mrgentox.2024.503726.
18. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:n71. doi:10.1136/bmj.n71.
19. Rethlefsen ML, Kirtley S, Waffenschmidt S, Ayala AP, Moher D, Page MJ, et al. PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for reporting literature searches in systematic reviews. *Syst Rev.* 2021;10:39. doi:10.1186/s13643-020-01542-z.
20. Cunha LRCS Jr, Pinto CA, Portilho A, Rocha CAM, Burbano R. Assays of genotoxic damage in peripheral blood lymphocytes of individuals occupationally exposed to different X-ray systems in hospital radiology departments. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2021;872:503421. doi:10.1016/j.mrgentox.2021.503421.
21. Farkas G, Kocsis ZS, Székely G, Dobozi M, Polgár C, Jurányi Z. Spontaneous chromosomal aberrations in blood lymphocytes and tumor development in hospital workers. *Anticancer Res.* 2022;42(2):1059-1066. doi:10.21873/anticancer.15593.
22. Doukali H, Salah GB, Rhouma BB, Hajjaji M, Jaouadi M, Belguith-Mahfouth N, et al. Cytogenetic monitoring of hospital staff exposed to ionizing radiation: optimize protocol considering DNA repair genes variability. *Int J Radiat Biol.* 2017;93(12):1283-1288. doi:10.1080/09553002.2017.1377361.
23. Sari-Minodier I, Orsière T, Auquier P, Martin F, Botta A. Cytogenetic monitoring by use of the micronucleus assay among hospital workers exposed to low doses of ionizing radiation. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2007;629(2):111-121. doi:10.1016/j.mrgentox.2007.01.010.

Como citar este artigo: Souza, G.S., Brito, G.R., Botelho, M.L., Souza, D.L.C., Paiva, M.J.M., Santos, M.S., Alves, R.C. (2026). Alterações citogenéticas associadas à exposição ocupacional à radiação ionizante em técnicos de radiologia: uma revisão sistemática. *O Mundo Da Saúde*, 50. <https://doi.org/10.15343/0104-7809.202650e19452025P>. *Mundo Saúde*. 2026,50:e19452025.