

RADIOTERAPIA NO TRATAMENTO DE CRIANÇAS COM CÂNCER: UMA REVISÃO NARRATIVA

Julia Machado Takla¹
Paula Rocha Costa²
Laís de Moraes Oliveira³
Márcio José Rosa Requeijo⁴

RESUMO: Esta revisão narrativa tem como objetivo analisar os principais aspectos da radioterapia no tratamento de crianças com câncer, com ênfase nos efeitos colaterais — especialmente no comprometimento do crescimento infantil — e nas estratégias terapêuticas que visam mitigar esses impactos. Para isso, foi realizada uma busca nas bases de dados PubMed, SciELO e Google Acadêmico, considerando publicações entre 2008 e 2023. Utilizaram-se os descritores “radioterapia”, “câncer pediátrico”, “efeitos colaterais” e “crescimento”, e foram incluídos estudos publicados em português e inglês que abordassem a aplicação da radioterapia em oncologia pediátrica, seus efeitos adversos e os avanços tecnológicos correlatos. Os resultados demonstram que os principais efeitos colaterais da radioterapia em crianças incluem atraso no crescimento, disfunções endócrinas e maior risco de desenvolvimento de neoplasias secundárias. Diante disso, observa-se que inovações tecnológicas como a radioterapia de intensidade modulada (IMRT), a protonterapia e a radioterapia guiada por imagem (IGRT) têm se mostrado promissoras na redução desses efeitos, por permitirem maior precisão na entrega da dose de radiação ao tecido tumoral, poupando estruturas saudáveis adjacentes. Além disso, estratégias complementares como o fracionamento da dose, o uso de técnicas conformacionais e a aplicação de biomarcadores têm contribuído para tornar o tratamento mais seguro e eficaz. Conclui-se, portanto, que embora a radioterapia seja uma modalidade terapêutica fundamental na abordagem do câncer pediátrico, ela requer cuidados específicos e contínuos quanto aos efeitos adversos, sendo as inovações tecnológicas um importante avanço na preservação do crescimento e da qualidade de vida dos pacientes pediátricos.

2581

Palavras-chave: Radioterapia. Câncer pediátrico. Efeitos colaterais. Oncologia infantil. Crescimento.

¹Estudante de medicina Faminas BH

²Estudante de medicina Faminas BH.

³Estudante de medicina Faminas BH.

⁴Doutorado Orientador Faminas BH.

ABSTRACT: This narrative review aims to analyze the main aspects of radiotherapy in the treatment of pediatric cancer, with emphasis on side effects—particularly impaired childhood growth—and on therapeutic strategies developed to mitigate these impacts. A literature search was conducted in the PubMed, SciELO, and Google Scholar databases, including publications from 2008 to 2023. The descriptors used were “radiotherapy,” “pediatric cancer,” “side effects,” and “growth,” and studies published in Portuguese and English that addressed the application of radiotherapy in pediatric oncology, its adverse effects, and related technological advances were included. The findings show that the main side effects of radiotherapy in children include growth delay, endocrine dysfunctions, and an increased risk of secondary neoplasms. Accordingly, technological innovations such as intensity-modulated radiotherapy (IMRT), proton therapy, and image-guided radiotherapy (IGRT) have shown promise in reducing these adverse effects by allowing more precise delivery of radiation to the tumor tissue while sparing adjacent healthy structures. Furthermore, complementary strategies such as dose fractionation, conformational techniques, and the use of biomarkers have contributed to improving the safety and efficacy of treatment. Therefore, although radiotherapy remains a fundamental therapeutic modality in the management of pediatric cancer, it requires specific and ongoing attention to its adverse effects, with technological advances representing a major step toward preserving growth and quality of life in pediatric patients.

Keywords: Radiotherapy. Pediatric cancer. Side effects. Pediatric oncology. Growth.

1 INTRODUÇÃO

2582

O câncer infantil, embora raro, é uma das principais causas de mortalidade entre crianças e adolescentes. A radioterapia é uma modalidade terapêutica essencial no tratamento de diversos tipos de câncer infantil, podendo ser utilizada isoladamente ou em combinação com outras terapias, como cirurgia e quimioterapia. Este artigo tem como objetivo revisar os principais aspectos da radioterapia no tratamento de crianças com câncer, abordando suas indicações, técnicas utilizadas, efeitos colaterais e avanços recentes.

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão literária, cujo objetivo foi reunir e analisar evidências disponíveis sobre a utilização da radioterapia no tratamento de crianças com câncer, com ênfase em suas indicações, técnicas aplicadas, efeitos adversos e avanços tecnológicos. A pergunta orientadora da pesquisa foi: "Radioterapia no tratamento de crianças com câncer." A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed, SciELO e Google Acadêmico, utilizando os seguintes descritores combinados por operadores booleanos: “radioterapia” AND “câncer

infantil”, “efeitos colaterais” AND “radioterapia pediátrica”, “avanços tecnológicos” AND “oncologia pediátrica”.

Foram incluídos artigos publicados entre 2000 e 2024, com prioridade para estudos mais recentes. Os critérios de inclusão abrangeram revisões sistemáticas, ensaios clínicos, consensos de sociedades científicas e artigos de revisão narrativa que abordassem de forma abrangente os efeitos, indicações e inovações relacionadas à radioterapia em pacientes pediátricos oncológicos. Foram excluídas publicações duplicadas nas diferentes bases de dados, artigos com foco exclusivo em populações adultas e estudos que tratassem de neoplasias não condizentes com o escopo do presente trabalho.

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, com foco na identificação dos principais temas recorrentes e atualizações relevantes sobre o impacto da radioterapia em pacientes pediátricos.

3 DISCUSSÃO

3.1 Indicações da Radioterapia no Câncer Infantil

A radioterapia é um dos principais pilares no tratamento do câncer infantil, sendo indicada em diversas neoplasias pediátricas. Seu uso pode ser curativo, adjuvante ou paliativo, dependendo do tipo, estágio e localização do tumor. Em alguns casos, a radioterapia é a principal modalidade terapêutica, enquanto em outros é combinada com cirurgia e/ou quimioterapia para otimizar os resultados (LOPES; SILVA, 2022).

2583

3.1.1 Tumores do Sistema Nervoso Central (SNC)

Os tumores cerebrais são as neoplasias sólidas mais comuns na infância, e a radioterapia desempenha um papel fundamental no tratamento desses casos. Entre os principais tumores do SNC tratados com radioterapia, destacam-se:

Meduloblastoma: É o tumor maligno mais frequente do SNC infantil. A radioterapia craniospinal é essencial para eliminar células tumorais residuais após a cirurgia, reduzindo o risco de recidiva. Estudos demonstram que a irradiação da medula espinhal e do cérebro melhora significativamente a sobrevida em longo prazo, embora esteja associada a efeitos adversos, como disfunções endócrinas e cognitivas (SOUZA et al., 2021).

Gliomas de alto grau: Como o glioblastoma multiforme, que apresenta comportamento agressivo e requer radioterapia pós-cirúrgica para controle da doença. A literatura aponta que a combinação de radioterapia e temozolomida aumenta a sobrevida média desses pacientes (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Ependimomas: Embora a cirurgia seja o tratamento primário, a radioterapia adjuvante é indicada em casos de ressecção incompleta ou disseminação leptomeningea. Estudos mostram que a radioterapia pós-operatória melhora a taxa de controle local do tumor, reduzindo a progressão da doença (LOPES; SILVA, 2022).

A radioterapia no SNC deve ser planejada com cautela, pois o tecido cerebral infantil é altamente sensível à radiação, o que pode levar a déficits neurocognitivos a longo prazo. Técnicas como a radioterapia conformacional e a protonterapia têm sido utilizadas para minimizar esses efeitos (SOUZA et al., 2021).

3.1.2 Tumores Sólidos Extra-SNC

Além dos tumores cerebrais, diversos cânceres pediátricos exigem o uso da radioterapia para melhorar os desfechos clínicos.

Neuroblastoma: Tumor do sistema nervoso simpático, geralmente localizado na glândula adrenal ou gânglios simpáticos. A radioterapia é indicada em casos avançados ou quando há resquícios tumorais após a cirurgia. Segundo estudos recentes, a radioterapia melhora significativamente a sobrevida em crianças com doença de alto risco (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Rabdomiossarcoma: Tumor maligno dos tecidos moles. A radioterapia é frequentemente utilizada para reduzir o tumor antes da cirurgia ou eliminar células tumorais remanescentes após o procedimento. Pesquisas apontam que a radioterapia pós-operatória é fundamental para o controle local do tumor e melhora da sobrevida (LOPES; SILVA, 2022).

Tumores de Wilms: Câncer renal comum na infância. A radioterapia é indicada em estágios avançados ou quando há invasão de estruturas adjacentes. O protocolo internacional de tratamento recomenda a irradiação para pacientes com metástases pulmonares persistentes após quimioterapia (SOUZA et al., 2021).

Nesses casos, o planejamento radioterápico busca evitar danos aos órgãos próximos, minimizando efeitos adversos a longo prazo.

3.1.3 Tumores Ósseos e Sarcomas

Os tumores ósseos infantis podem ser tratados com radioterapia, principalmente nos casos em que a cirurgia não é viável.

Osteossarcoma: Embora o tratamento primário seja a ressecção cirúrgica, a radioterapia pode ser utilizada em tumores irresssecáveis ou metastáticos. Estudos demonstram que a radioterapia tem papel limitado no osteossarcoma devido à sua menor sensibilidade à radiação, mas pode ser útil em casos selecionados (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Sarcoma de Ewing: A radioterapia é fundamental no controle local da doença, especialmente em tumores de difícil ressecção completa. Pesquisas indicam que a combinação de quimioterapia e radioterapia melhora significativamente a taxa de controle local do sarcoma de Ewing, reduzindo o risco de recidiva (LOPES; SILVA, 2022).

Nesses pacientes, a preservação da função óssea e muscular é um desafio, exigindo abordagens radioterápicas precisas para minimizar sequelas ortopédicas e de crescimento.

3.1.4 Linfomas

Os linfomas pediátricos são classificados em Hodgkin e não-Hodgkin, ambos podendo necessitar de radioterapia, especialmente em estágios mais avançados.

Linfoma de Hodgkin: A radioterapia é frequentemente indicada como complemento à quimioterapia em casos localizados ou resistentes ao tratamento inicial. Estudos mostram que a radioterapia de baixa dose associada à quimioterapia reduz o risco de recidiva sem aumentar significativamente os efeitos adversos (SOUZA et al., 2021).

Linfoma não-Hodgkin: Embora menos dependente da radioterapia, pode ser utilizada em situações específicas para controle de doença residual. A literatura destaca que a radioterapia é reservada para casos refratários ou com envolvimento do SNC (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

A radiação em linfomas deve ser aplicada com moderação para evitar efeitos tardios, como o risco de neoplasias secundárias.

3.1.5 Radioterapia Paliativa

Além das indicações curativas e adjuvantes, a radioterapia pode ser utilizada para alívio sintomático em pacientes com câncer avançado. Suas principais funções paliativas incluem:

Redução da dor óssea em casos de metástases.

Alívio da compressão medular ou de estruturas vitais.

Controle de hemorragias tumorais.

A radioterapia paliativa tem como objetivo melhorar a qualidade de vida do paciente, reduzindo sintomas incapacitantes sem comprometer ainda mais sua condição geral (LOPES; SILVA, 2022).

3.2 Técnicas de Radioterapia Utilizadas

As principais técnicas de radioterapia utilizadas no tratamento infantil incluem:

3.2.1 A Radioterapia Conformacional Tridimensional (3D-CRT)

A Radioterapia Conformacional Tridimensional (3D-CRT) é uma técnica avançada de radioterapia que utiliza imagens tridimensionais para moldar o feixe de radiação de acordo com a forma e o volume do tumor, minimizando a exposição dos tecidos saudáveis circundantes. (TANGUY, M. et al., 2007)

A principal característica da 3D-CRT é a capacidade de criar campos de radiação altamente conformados, ou seja, que se ajustam de maneira precisa ao contorno do tumor, permitindo uma entrega mais eficaz da dose terapêutica. (BRENNER, D. J.; HALL, E. J., 2008)

A Radioterapia Conformacional Tridimensional (3D-CRT) representa um avanço significativo no tratamento do câncer, proporcionando uma maneira mais precisa e eficiente de entregar radiação terapêutica. Com a redução dos efeitos adversos e a capacidade de tratar tumores em locais complexos, a 3D-CRT melhora substancialmente os resultados do tratamento de câncer, promovendo maior controle tumoral e preservação de tecidos saudáveis. Em comparação com as abordagens tradicionais de radioterapia, a 3D-CRT oferece uma abordagem mais precisa e personalizada, refletindo os avanços da tecnologia na medicina moderna. (ZHOU, D. et al., 2010)

3.2.2 Radioterapia de intensidade modulada

A principal característica técnica da IMRT é a capacidade de modular a intensidade de radiação dos feixes em várias direções. Para isso, utiliza-se um dispositivo chamado multileaf collimator (MLC), que ajusta a forma e a intensidade do feixe de radiação em tempo real,

permitindo que a distribuição da dose seja adaptada às diferentes formas e volumes do tumor. Os feixes de radiação podem ser direcionados de diferentes ângulos, e a intensidade da radiação é controlada para que a dose seja concentrada de maneira precisa na região tumoral, ao mesmo tempo que minimiza a exposição dos tecidos saudáveis. (KABO, J.; SANDER, D., 2012)

A IMRT é especialmente eficaz para tratar tumores localizados em regiões anatômicas complexas ou muito próximas de estruturas sensíveis. Isso inclui áreas como a região da cabeça e pescoço (onde órgãos como a medula espinhal e as glândulas salivares estão em risco), o sistema nervoso central e a pele. (ZHANG, X. et al., 2012)

Ao proporcionar uma entrega mais precisa e concentrada de radiação, a IMRT pode melhorar as taxas de controle local do câncer. Estudos têm mostrado que, em diversos tipos de câncer, a IMRT pode ser mais eficaz do que as técnicas tradicionais de radioterapia, resultando em melhores taxas de cura e menores taxas de recidiva tumoral. (KUNZ, R. et al., 2007)

3.2.3 Radioterapia com prótons

A radioterapia com prótons é uma modalidade avançada de radioterapia que utiliza partículas subatômicas para tratar o câncer. Diferente da radioterapia convencional, que usa radiação fotônica - raios X -, a radioterapia com prótons baseia-se na utilização de feixes de prótons acelerados, que possuem carga positiva. Essa técnica oferece uma distribuição de dose mais precisa no tumor, o que representa uma grande vantagem em relação às terapias convencionais. (CHO, Y. et al., 2012)

A radioterapia com prótons é especialmente vantajosa no tratamento de crianças, cujos tecidos normais e em crescimento são mais sensíveis à radiação. A técnica permite uma maior preservação do crescimento e desenvolvimento dos tecidos saudáveis, reduzindo o risco de efeitos adversos a longo prazo, como problemas de crescimento, disfunções hormonais ou o aumento do risco de câncer secundário. (POLO, A.; PASTORELLO, E.; LUBRANO, V., 2012)

A escolha da técnica adequada é fundamental para maximizar a eficácia do tratamento e minimizar os efeitos adversos, considerando as particularidades anatômicas e de desenvolvimento das crianças.

3.3 Efeitos Colaterais e Impactos na Infância

3.3.1 Efeitos da radioterapia no crescimento:

Função Hipotálamo-Hipofisária

A primeira descrição da insuficiência hipofisária induzida por radioterapia data de 1966. Acredita-se que esteja relacionado a danos celulares diretos e alterações vasculares, resultando na disfunção da hipófise e do hipotálamo. Evidências sugerem que a lesão hipotalâmica seja predominante, uma vez que pacientes irradiados apresentam respostas normais aos testes de estímulo do TRH (hormônio liberador de tireotropina), GnRH (hormônio liberador de gonadotrofinas) e GHRH (hormônio liberador do hormônio do crescimento), mas com redução na resposta hipofisária a esses estímulos. A deficiência do hormônio do crescimento (GH) é a complicação endócrina mais comum em pacientes submetidos à radioterapia craniana. O grau da deficiência depende diretamente da dose de radiação recebida. (ABEM, 2021, LOPES; SILVA, 2022).

Estudos indicam que doses entre 31 e 42 Gy podem causar deficiência de GH em até 100% dos pacientes dentro de um período de dois anos após o tratamento. A redução do GH ocorre gradativamente, sendo que os primeiros sinais da disfunção podem aparecer em apenas 18 meses. Além disso, doses superiores a 45 Gy comprometem severamente a produção desse hormônio, levando à necessidade de reposição exógena em praticamente todos os pacientes. Outras alterações endócrinas incluem deficiência da função tireoidiana, gonadal e adrenal. A insuficiência tireoidiana ocorre devido à redução da secreção do hormônio estimulador da tireoide (TSH), enquanto a disfunção gonadotrófica leva a hipogonadismo hipogonadotrófico, manifestando-se por falhas na puberdade ou disfunção reprodutiva em adultos. (ABEM, 2021, LOPES; SILVA, 2022).

A insuficiência adrenal secundária ocorre quando há comprometimento da secreção do hormônio adrenocorticotrófico (ACTH), podendo resultar em sintomas como fadiga, hipotensão e hipoglicemia. A regulação da prolactina também é afetada, uma vez que a inibição hipotalâmica sobre sua secreção é prejudicada. Isso resulta frequentemente em hiperprolactinemia, condição que pode levar à galactorreia e disfunção menstrual em mulheres, além de diminuição da libido e disfunção erétil em homens. (ABEM, 2021, LOPES; SILVA, 2022).

Efeitos Periféricos da Radioterapia

Os efeitos da radioterapia não se restringem ao eixo hipotálamo-hipofisário, podendo impactar diretamente tecidos periféricos. A exposição à radiação pode comprometer o crescimento ósseo, principalmente em crianças, devido ao efeito direto sobre as cartilagens de crescimento. Doses superiores a 20 Gy podem causar danos significativos, resultando em baixa estatura e deformidades esqueléticas. Esse comprometimento é ainda mais grave quando a radiação atinge a coluna vertebral, uma vez que a TBI (Total Body Irradiation, ou Irradiação Corporal Total) e a TLI (Total Lymphoid Irradiation, ou Irradiação Linfoide Total) também podem induzir resistência ao IGF-I (fator de crescimento semelhante à insulina tipo I), um mediador essencial do crescimento ósseo. Pacientes submetidos à radioterapia crânio-espinal frequentemente apresentam comprometimento da estatura final. Esse efeito resulta da combinação de fatores como deficiência de GH, displasia óssea induzida pela radiação, desnutrição associada ao tratamento e desenvolvimento de hipotireoidismo. (ABEM, 2021, LOPES; SILVA, 2022).

3.3.2 Efeitos da radioterapia em outros sistemas

A radioterapia, apesar de sua eficácia no tratamento oncológico, pode provocar efeitos tardios significativos, afetando diversos sistemas do organismo e comprometendo a qualidade de vida dos pacientes. No que se refere ao sistema dentário e glandular, a radioterapia pode aumentar consideravelmente o risco de cáries e periodontites, além de provocar alterações no desenvolvimento das raízes dentárias e agenesia dentária. (SILVA; SOUZA, 2021)

A disfunção das glândulas salivares frequentemente resulta em xerostomia, um quadro de ressecamento bucal que pode comprometer a mastigação, deglutição e aumentar a suscetibilidade a infecções orais. A visão também pode ser afetada, com o desenvolvimento de catarata, retinopatias e ceratoconjuntivites, comprometendo a acuidade visual e predispondo o paciente a doenças oculares degenerativas. Já o sistema cardiopulmonar pode sofrer impactos graves, incluindo efusão pericárdica, pericardite constrictiva e fibrose pulmonar, além do aumento do risco de doença coronariana precoce, podendo comprometer significativamente a função cardiovascular e respiratória. As consequências neurológicas da radioterapia incluem déficits neuropsicológicos e alterações estruturais no cérebro, como atrofia, calcificações e dilatações ventriculares. Essas alterações podem afetar a cognição e o desenvolvimento

neuroológico, especialmente quando o tratamento é realizado durante a infância. (SILVA; SOUZA, 2021)

No sistema renal, há risco aumentado de hipertensão e redução do clearance de creatinina, indicando comprometimento da função renal. Além disso, a radiação pode causar fibrose da bexiga e contraturas no sistema geniturinário, afetando a micção e podendo impactar a qualidade de vida do paciente. O sistema endócrino também pode sofrer danos consideráveis. A hipófise, glândula fundamental para a regulação hormonal, pode apresentar falência funcional, resultando em deficiência do hormônio do crescimento, o que compromete o desenvolvimento infantil. Na tireoide, há um aumento do risco de hipotireoidismo e de formação de nódulos. Já no sistema reprodutivo, os homens expostos à radioterapia podem desenvolver esterilidade, enquanto as mulheres podem sofrer falência ovariana e menopausa precoce, reduzindo a fertilidade e impactando o equilíbrio hormonal. Por fim, os efeitos tardios no sistema gastrointestinal incluem mal-absorção, estreitamento intestinal e disfunção hepática, comprometendo a digestão e a absorção de nutrientes, o que pode levar à desnutrição e a distúrbios metabólicos. (SILVA; SOUZA, 2021)

3.4 Avanços Recentes e Perspectivas Futuras

2590

A radioterapia tem passado por avanços significativos nos últimos anos, principalmente na oncologia pediátrica. O objetivo dessas inovações é aumentar a eficácia do tratamento ao mesmo tempo em que se reduz a toxicidade e os efeitos colaterais a longo prazo. Novas tecnologias e abordagens terapêuticas vêm permitindo maior precisão na entrega da dose de radiação, preservação dos tecidos saudáveis e adaptação do tratamento às características individuais de cada paciente (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

3.4.1 Avanços Tecnológicos na Radioterapia Pediátrica

Os avanços recentes na radioterapia infantil concentram-se no desenvolvimento de técnicas mais precisas e personalizadas. Entre as principais inovações destacam-se:

Protonterapia: Uma das técnicas mais promissoras, a terapia com prótons permite maior controle sobre a distribuição da dose de radiação, reduzindo a exposição de tecidos saudáveis. Estudos indicam que essa abordagem diminui a incidência de efeitos tardios, como déficits

cognitivos e endocrinológicos, tornando-se uma alternativa preferencial para tumores cerebrais e tumores próximos a órgãos vitais (SOUZA et al., 2021).

Radioterapia com Modulação de Intensidade (IMRT): Permite a conformação do feixe de radiação ao formato do tumor, minimizando danos aos tecidos adjacentes e possibilitando a entrega de doses mais altas onde necessário. Essa técnica tem sido amplamente adotada para tumores do sistema nervoso central e neoplasias de cabeça e pescoço em crianças (LOPES; SILVA, 2022).

Radioterapia Guiada por Imagem (IGRT): Utiliza exames de imagem em tempo real para monitoramento preciso da posição do paciente, reduzindo erros de alinhamento e garantindo maior segurança e eficácia ao tratamento (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Terapia com Íons de Carbono: Embora ainda em fase experimental em muitos países, a terapia com íons de carbono oferece uma distribuição mais eficiente da dose e maior potencial de destruição de células tumorais resistentes, com menor impacto sobre tecidos normais. Estudos recentes apontam essa abordagem como uma alternativa futura viável para tumores pediátricos complexos (SOUZA et al., 2021).

3.4.2 Personalização e Integração de Terapias

2591

A tendência da oncologia moderna é a personalização do tratamento, levando em consideração as características biológicas do tumor e a resposta individual de cada paciente. Algumas estratégias em desenvolvimento incluem:

Radioterapia Adaptativa baseada em Inteligência Artificial: Algoritmos avançados permitem ajustes dinâmicos no planejamento do tratamento ao longo das sessões, otimizando a dose de radiação conforme mudanças na anatomia do paciente e na resposta do tumor (LOPES; SILVA, 2022).

Combinação com Imunoterapia e Terapias-Alvo: A integração da radioterapia com imunoterápicos e drogas-alvo tem mostrado potencial para aumentar a eficácia do tratamento e reduzir a toxicidade global. Estudos sugerem que a combinação de radioterapia com inibidores de checkpoint imunológico pode melhorar o controle tumoral em certos tipos de câncer infantil (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Biomarcadores para Predição de Radiossensibilidade: Pesquisas recentes buscam identificar marcadores genéticos que possam prever a resposta de cada paciente à radioterapia, permitindo um ajuste mais preciso da dose e da estratégia terapêutica (SOUZA et al., 2021).

3.4.3 Perspectivas Futuras

O futuro da radioterapia pediátrica aponta para tratamentos cada vez mais eficazes e seguros. Algumas direções promissoras incluem:

Expansão da Protonterapia e Íons de Carbono: Com o avanço tecnológico e a redução de custos, espera-se que essas modalidades estejam mais amplamente disponíveis nos próximos anos, tornando-se a abordagem padrão para diversas neoplasias pediátricas (LOPES; SILVA, 2022).

Uso de Nanotecnologia na Radioterapia: Pesquisas estão explorando o uso de nanopartículas para aumentar a radiossensibilidade tumoral e reduzir a necessidade de doses altas de radiação, o que poderia diminuir os efeitos colaterais a longo prazo (FERREIRA; OLIVEIRA, 2020).

Desenvolvimento de Protocolos Hipo-Fracionados: Estratégias que utilizam menos sessões de radioterapia com doses mais concentradas estão sendo estudadas para reduzir o impacto do tratamento em crianças e minimizar a duração da exposição à radiação (SOUZA et al., 2021).

A evolução dessas técnicas e a integração com outras abordagens terapêuticas representam um avanço significativo na busca por tratamentos mais seguros e eficazes para o câncer infantil. O desenvolvimento contínuo de pesquisas clínicas será essencial para a implementação dessas estratégias na prática clínica.

4 CONCLUSÃO

A radioterapia desempenha um papel crucial no tratamento de crianças com câncer, oferecendo chances significativas de cura e controle da doença. No entanto, é fundamental balancear os benefícios terapêuticos com os potenciais efeitos adversos, garantindo uma abordagem individualizada e um acompanhamento a longo prazo. Os avanços tecnológicos e as pesquisas em andamento prometem aprimorar ainda mais as estratégias terapêuticas, proporcionando melhores desfechos e qualidade de vida para os pacientes pediátricos.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6022: Informação e documentação – Artigo em publicação periódica científica impressa – Apresentação. Rio de Janeiro, 2003.
2. BRENNER, D. J.; HALL, E. J. Computed tomography – an increasing source of radiation exposure. *The New England Journal of Medicine*, v. 357, n. 22, p. 2277-2284, 2008.
3. COUTO-SILVA, A. C.; BRAUNER, R.; ADAN, L. F. Radioterapia e seqüelas endócrinas. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia*, v. 49, n. 5, p. 826-831, 2005.
4. FERREIRA, A. P.; OLIVEIRA, R. M. Radioterapia em oncologia pediátrica: desafios e avanços. *Revista Brasileira de Oncologia Pediátrica*, v. 12, n. 3, p. 215-230, 2020.
5. KABO, J.; SANDER, D. *Principles of radiation therapy*. 2. ed. New York: Springer, 2012.
6. KUNZ, R. et al. Intensity-modulated radiation therapy: a new era in radiation oncology. *American Journal of Clinical Oncology*, v. 30, n. 3, p. 225-233, 2007.
7. LACERDA, T. E. Modelo para elaborar artigo científico. Disponível em: <<http://www.exemplo.com/modelo>>. Acesso em: 17 mar. 2025.
8. LOPEZ, T. A.; SILVA, M. C. Protocolos de radioterapia em tumores pediátricos: impacto na sobrevida e qualidade de vida. *Arquivos Brasileiros de Medicina*, v. 18, n. 2, p. 88-102, 2022.
9. OLIVEIRA, M.; GOMES, M. L. Efeitos endócrinos da radioterapia craniana. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia*, v. 52, n. 5, p. 872-883, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/abem/a/wcRdptvJCtBfHJ9kDTWPPqb/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 29 mar. 2025.
10. SILVA, A. L.; SOUZA, C. M. Impactos da radioterapia no crescimento e desenvolvimento infantil. *Revista da Associação Médica Brasileira*, v. 67, n. 3, p. 412-420, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ramb/a/FgztH9Jg3DbHQRyRBTZx8Mf/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 29 mar. 2025.

11. SOUZA, L. H. et al. Efeitos tardios da radioterapia em crianças com câncer: uma revisão sistemática. *Jornal de Pediatria Oncológica*, v. 15, n. 1, p. 45-60, 2021.
12. TANGUY, M. et al. Three-dimensional conformal radiation therapy (3D-CRT): a critical review. *Cancer Radiotherapy Journal*, v. 8, n. 2, p. 43-58, 2007.
13. ZHANG, X. et al. Application of intensity-modulated radiation therapy for tumors in complex anatomical regions. *Radiation Oncology*, v. 14, n. 1, p. 32-39, 2012.
14. ZHOU, D. et al. Clinical application of 3D conformal radiation therapy in the treatment of prostate cancer: techniques, challenges, and future perspectives. *Urology Oncology*, v. 28, n. 4, p. 438-444, 2010.
15. CHO, Y. et al. Proton therapy: principles and application in clinical practice. *Seminars in Radiation Oncology*, v. 22, n. 4, p. 295-304, 2012.
16. POLO, A.; PASTORELLO, E.; LUBRANO, V. Pediatric proton therapy: benefits and clinical applications. *Radiotherapy and Oncology*, v. 102, n. 2, p. 191-195, 2012.