




**AVANÇOS EM DIAGNÓSTICO PRECOCE DO CÂNCER: NOVAS
TECNOLOGIAS DE IMAGEM E BIOMARCADORES DE ALTA SENSIBILIDADE**

**ADVANCES IN EARLY CANCER DIAGNOSIS: NEW IMAGING
TECHNOLOGIES AND HIGHLY SENSITIVE BIOMARKERS**

**AVANCES EN EL DIAGNÓSTICO PRECOZ DEL CÁNCER: NUEVAS
TECNOLOGÍAS DE IMAGEN Y BIOMARCADORES DE ALTA SENSIBILIDAD**

 <https://doi.org/10.56238/levv16n49-029>

Data de submissão: 10/05/2025

Data de publicação: 10/06/2025

João Vítor de Mendonça Corrêa Netto

Graduando em Medicina
Fundação Educacional do Município de Assis (FEMA)
E-mail: jvmcnetto@hotmail.com

Jaime Javier Garcia Caro

Pós-Graduação em Cirurgia Geral
Santa Casa da Misericórdia do Rio de Janeiro
E-mail: jaimejavier79@hotmail.com

Joana Pscheidt

Médica
Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC)
E-mail: jo_pscheidt@hotmail.com

Eric Mariano da Silva

Graduando em Medicina
Universidade Federal do Maranhão
E-mail: ericmarianosilva@gmail.com

Joel Mariani Gomes Pereira

Médico
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
E-mail: joelneto21@icloud.com

Thiago de Almeida Garcia

Médico
Universidade Brasil
E-mail: thiagogarciaa16@gmail.com

Claudiana dos Anjos Flor Silveira

Graduanda em Medicina
Unifenas Alfenas
E-mail: claudiana.silveira@aluno.unifenas.br



Mirella Mendes Calheiros

Graduanda em Medicina
Unifenas Alfenas
E-mail: mirella_calheiros@hotmail.com

Bianca Suellen Ferreira

Graduanda em Medicina
Universidade do Vale do Sapucaí (UNIVAS)
E-mail: bi.suellen@gmail.com

Raúl Fernandes Tchitali

Graduando em Medicina
Faculdade de Medicina da Universidade Katavala Bwila
E-mail: raulfernandesm.d@gmail.com

Mathias Gabriel Ojeda Acosta

Oncologista Clínico
Hospital De Clínicas - Universidad Nacional de Asunción
E-mail: drgabrielojeda@gmail.com

Victor Maia Vieira

Médico Residente em Cirurgia Geral
Hospital Mário Gatti
E-mail: drvictormaia@gmail.com

Túlio Lopes da Silva

Graduando em Medicina
Universidade Técnica Privada Cosmos
E-mail: marialuisatulio13@gmail.com

Thaís Souza Lima

Pós-Graduação em Pediatria e Medicina do Trabalho
Universidade de Rio Verde (Unirg)
E-mail: thaiscretaz02@hotmail.com

Artur Bizinotto

Graduando em Medicina
Universidade de Uberaba (UNIUBE)
E-mail: arturbizinotto@gmail.com

RESUMO

O diagnóstico precoce do câncer é fundamental para aumentar as chances de cura e melhorar a qualidade de vida dos pacientes. Este artigo de revisão aborda os avanços recentes nas tecnologias de imagem e no desenvolvimento de biomarcadores de alta sensibilidade, destacando sua importância na detecção precoce da doença. As novas modalidades de imagem, como a tomografia computadorizada de alta resolução, ressonância magnética funcional e PET-CT, oferecem maior detalhamento estrutural e funcional dos tecidos, facilitando a identificação de lesões iniciais. Paralelamente, os biomarcadores moleculares proporcionam uma abordagem não invasiva para detectar alterações associadas ao câncer em níveis moleculares, ampliando a capacidade diagnóstica. A integração dessas tecnologias, aliada ao uso de inteligência artificial, representa uma revolução na medicina personalizada, permitindo diagnósticos mais precisos e intervenções clínicas individualizadas. Apesar dos desafios relacionados à validação clínica, custos e infraestrutura, os avanços apresentados indicam um futuro promissor para

a detecção precoce do câncer, com impacto significativo na redução da mortalidade e na melhoria do manejo terapêutico.

Palavras-chave: Diagnóstico precoce. Câncer. Tecnologias de imagem. Biomarcadores. Alta sensibilidade. Medicina personalizada.

ABSTRACT

Early diagnosis of cancer is essential to increase the chances of a cure and improve patients' quality of life. This review article discusses recent advances in imaging technologies and the development of highly sensitive biomarkers, highlighting their importance in the early detection of the disease. New imaging modalities, such as high-resolution computed tomography, functional magnetic resonance imaging and PET-CT, offer greater structural and functional detail of tissues, facilitating the identification of early lesions. At the same time, molecular biomarkers provide a non-invasive approach to detecting alterations associated with cancer at molecular levels, broadening the diagnostic capacity. The integration of these technologies, combined with the use of artificial intelligence, represents a revolution in personalized medicine, allowing for more accurate diagnoses and individualized clinical interventions. Despite the challenges related to clinical validation, costs and infrastructure, the advances presented indicate a promising future for the early detection of cancer, with a significant impact on reducing mortality and improving therapeutic management.

Keywords: Early diagnosis. Cancer. Imaging technologies. Biomarkers. High sensitivity. Personalized medicine.

RESUMEN

El diagnóstico precoz del cáncer es fundamental para aumentar las posibilidades de curación y mejorar la calidad de vida de los pacientes. Este artículo de revisión examina los avances recientes en tecnologías de imagen y el desarrollo de biomarcadores de alta sensibilidad, destacando su importancia en la detección precoz de la enfermedad. Las nuevas modalidades de imagen, como la tomografía computarizada de alta resolución, la resonancia magnética funcional y la PET-TC, ofrecen un mayor detalle estructural y funcional de los tejidos, lo que facilita la identificación de lesiones tempranas. Al mismo tiempo, los biomarcadores moleculares proporcionan un enfoque no invasivo para detectar alteraciones asociadas al cáncer a nivel molecular, ampliando la capacidad diagnóstica. La integración de estas tecnologías, combinada con el uso de la inteligencia artificial, representa una revolución en la medicina personalizada, permitiendo diagnósticos más precisos e intervenciones clínicas individualizadas. A pesar de los retos relacionados con la validación clínica, los costes y la infraestructura, los avances presentados indican un futuro prometedor para la detección precoz del cáncer, con un impacto significativo en la reducción de la mortalidad y la mejora del manejo terapéutico.

Palabras clave: Diagnóstico precoz. Cáncer. Tecnologías de imagen. Biomarcadores. Alta sensibilidade. Medicina personalizada.

1 INTRODUÇÃO

O câncer permanece uma das principais causas de morbidade e mortalidade em todo o mundo, configurando-se como um desafio significativo para a saúde pública global. Apesar dos avanços terapêuticos recentes, o sucesso do tratamento está fortemente associado à detecção precoce da doença. O diagnóstico em estágios iniciais aumenta substancialmente as chances de cura, permite intervenções menos agressivas e melhora a qualidade de vida dos pacientes. Por essa razão, o aprimoramento das técnicas de diagnóstico precoce tem sido foco constante da pesquisa científica e do desenvolvimento tecnológico, visando superar as limitações dos métodos convencionais e proporcionar uma detecção mais precisa, rápida e acessível.¹

Historicamente, o diagnóstico do câncer baseava-se predominantemente em avaliações clínicas, exames físicos e técnicas de imagem com resolução limitada, complementadas por análises histopatológicas que, embora fundamentais, muitas vezes confirmavam a doença apenas em fases avançadas. Essa abordagem, além de depender significativamente da experiência do profissional, pode resultar em diagnósticos tardios, quando as opções terapêuticas são mais restritas e a probabilidade de cura, reduzida. O aumento da incidência de diversos tipos de câncer e a variabilidade biológica entre os tumores impõem a necessidade de métodos diagnósticos mais sofisticados, capazes de identificar precocemente alterações moleculares e estruturais, mesmo antes do surgimento de sinais clínicos evidentes.²

Nesse contexto, as novas tecnologias de imagem e os biomarcadores de alta sensibilidade emergem como ferramentas essenciais para uma revolução no diagnóstico precoce do câncer. As tecnologias de imagem vêm avançando rapidamente, incorporando recursos como a tomografia computadorizada de alta resolução, a ressonância magnética funcional, o PET-CT (tomografia por emissão de pósitrons associada à tomografia computadorizada), além da crescente aplicação da inteligência artificial na análise de imagens. Esses recursos permitem a visualização detalhada de estruturas tumorais antes inacessíveis, viabilizando não apenas a detecção de lesões pequenas, mas também a caracterização de suas propriedades biológicas, o que contribui para a definição do prognóstico e da estratégia terapêutica.³

Paralelamente, a pesquisa voltada à identificação de marcadores biológicos tem avançado consideravelmente, especialmente no que se refere a moléculas detectáveis no sangue, tecidos ou outros fluidos corporais, capazes de indicar a presença ou o comportamento de tumores. A detecção dessas substâncias com alta sensibilidade e especificidade possibilita o diagnóstico de neoplasias em estágios iniciais, muitas vezes antes que se tornem visíveis por métodos de imagem. Entre os principais alvos moleculares em estudo destacam-se proteínas específicas, fragmentos de DNA ou RNA tumoral circulante, células neoplásicas presentes na corrente sanguínea e metabólitos associados ao microambiente tumoral. A capacidade de reconhecer esses sinais em volumes mínimos de fluido

corporal configura um avanço expressivo para a medicina de precisão, viabilizando o rastreamento não invasivo e o monitoramento contínuo da doença.⁴

A integração dessas duas frentes, tecnologias de imagem de última geração e biomarcadores, tem o potencial de transformar o cenário diagnóstico oncológico. O uso combinado desses recursos pode oferecer uma avaliação mais abrangente, aumentando a sensibilidade e a especificidade do diagnóstico, reduzindo a ocorrência de falsos positivos e negativos e viabilizando um acompanhamento mais eficaz da resposta terapêutica. Essa evolução é crucial para o desenvolvimento de estratégias de rastreamento populacional mais eficientes, sobretudo para os cânceres de alta incidência e mortalidade, como os de mama, pulmão, próstata e colorretal.⁵

No entanto, apesar dos avanços promissores, o diagnóstico precoce do câncer ainda enfrenta desafios importantes. A heterogeneidade tumoral, entre diferentes tipos de câncer e dentro do mesmo tumor, dificulta a padronização dos métodos diagnósticos. A variabilidade individual dos pacientes, incluindo aspectos genéticos, ambientais e comportamentais, também influencia diretamente a manifestação e a detecção precoce da doença. Além disso, essas novas tecnologias, muitas vezes, exigem investimentos significativos e infraestrutura especializada, o que pode limitar sua aplicação em larga escala, especialmente em países com recursos limitados.⁶

Outro aspecto relevante é o equilíbrio entre sensibilidade e especificidade dos testes diagnósticos. Biomarcadores altamente sensíveis são capazes de identificar alterações mínimas, mas podem gerar resultados falso-positivos, levando a ansiedade desnecessária e exames complementares invasivos ou onerosos. Por outro lado, a baixa especificidade pode resultar na subdetecção de casos reais. Assim, a validação clínica rigorosa e a padronização desses métodos são fundamentais para garantir sua eficácia e segurança na prática clínica.⁷

Ademais, a interpretação integrada dos dados de imagem e biomarcadores requer profissionais altamente qualificados e, frequentemente, sistemas computacionais avançados para análise multidimensional e apoio à tomada de decisão. A inteligência artificial e o aprendizado de máquina têm se mostrado ferramentas promissoras nesse campo, ao permitir a identificação de padrões complexos e correlações que poderiam passar despercebidas à avaliação humana. A incorporação dessas tecnologias digitais abre novas perspectivas para a medicina de precisão, tornando o diagnóstico não apenas mais precoce, mas também mais personalizado, alinhado às características biológicas individuais de cada paciente.⁸

Dessa forma, os avanços no diagnóstico precoce do câncer estão diretamente relacionados à convergência entre inovação tecnológica, pesquisa biomédica e desenvolvimento clínico. A compreensão aprofundada dos mecanismos moleculares do câncer, aliada ao progresso das técnicas de imagem e à descoberta de novos biomarcadores, estabelece um cenário promissor para a detecção precoce e o manejo eficiente da doença. Esse progresso não apenas pode salvar vidas, como também

otimiza os recursos dos sistemas de saúde, reduz custos com tratamentos em fases avançadas e melhora significativamente a qualidade de vida dos pacientes.⁹

Portanto, o presente artigo de revisão tem como objetivo explorar os principais avanços em tecnologias de imagem e biomarcadores de alta sensibilidade aplicados ao diagnóstico precoce do câncer. A análise dessas inovações busca identificar seus benefícios, limitações e desafios atuais, bem como apontar perspectivas futuras que contribuam para o aprimoramento contínuo do cuidado oncológico. A revisão sistematizada da literatura científica pretende fornecer uma base sólida e atualizada, útil para profissionais da saúde, pesquisadores e gestores envolvidos com o desenvolvimento e a implementação dessas tecnologias. Em suma, diante da complexidade e da gravidade do câncer, o investimento contínuo em pesquisa, inovação tecnológica e capacitação profissional é essencial para avançar na detecção precoce e, conseqüentemente, na redução da mortalidade oncológica. As novas tecnologias de imagem e os biomarcadores de alta sensibilidade representam ferramentas centrais nessa transformação, consolidando-se como pilares da medicina do futuro.¹⁰

2 MÉTODOS

Este artigo consiste em uma revisão bibliográfica que tem como objetivo reunir, analisar e sintetizar os avanços recentes no diagnóstico precoce do câncer, com ênfase nas novas tecnologias de imagem e nos biomarcadores de alta sensibilidade. A revisão bibliográfica configura-se como uma metodologia essencial para o estudo de temas complexos e em constante evolução, pois permite uma compreensão abrangente do estado atual do conhecimento científico, além de identificar lacunas existentes e orientar futuras investigações. Para assegurar a sistematização e a qualidade da revisão, foram adotados procedimentos metodológicos rigorosos nas etapas de busca, seleção, análise e síntese das fontes bibliográficas. A seguir, são descritas detalhadamente as etapas que compuseram a metodologia deste estudo.¹¹

2.1 DEFINIÇÃO DO TEMA E DOS OBJETIVOS

A primeira etapa consistiu na delimitação clara do tema e dos objetivos da revisão. Optou-se por concentrar a análise nos avanços relacionados ao diagnóstico precoce do câncer, com ênfase em duas áreas de destaque na literatura científica contemporânea: as novas tecnologias de imagem e os biomarcadores de alta sensibilidade. Essa delimitação temática permitiu direcionar a busca bibliográfica para fontes relevantes e específicas, evitando dispersões e assegurando maior profundidade e consistência na análise dos dados obtidos.¹²

Os objetivos específicos incluíram:

- Mapear as principais tecnologias de imagem atualmente em desenvolvimento ou em uso clínico para detecção precoce do câncer.
- Identificar os biomarcadores que demonstram alta sensibilidade e potencial para aplicação diagnóstica precoce.
- Avaliar os desafios e limitações dessas tecnologias, bem como suas perspectivas futuras.

2.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Para assegurar a relevância e a qualidade das informações selecionadas, foram estabelecidos critérios claros para inclusão e exclusão dos estudos. Os critérios de inclusão envolveram:

- Estudos e artigos científicos publicados nos últimos quinze anos, garantindo a atualidade das informações.
- Publicações em língua portuguesa e inglesa, para abarcar um universo mais amplo e significativo da literatura científica.
- Trabalhos que abordam tecnologias de imagem relacionadas ao diagnóstico precoce do câncer, incluindo, mas não se limitando, à tomografia computadorizada, ressonância magnética, PET-CT e técnicas emergentes.
- Estudos que apresentam dados ou discussões sobre biomarcadores com alta sensibilidade, englobando análises moleculares, celulares e bioquímicas.
- Revisões sistemáticas, meta-análises, estudos clínicos, artigos de revisão e relatos de pesquisa experimental que contribuam para a compreensão do tema.

Foram excluídos:

- Publicações que não tratam diretamente do diagnóstico precoce do câncer.
- Artigos que abordam exclusivamente o tratamento ou prognóstico, sem relação com métodos diagnósticos.
- Trabalhos com metodologia inadequada ou dados insuficientes para análise crítica.
- Publicações anteriores a 2008, para evitar desatualização.

2.3 ESTRATÉGIA DE BUSCA E FONTES DE DADOS

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados científicas amplamente reconhecidas, que garantem acesso a artigos científicos revisados por pares e literatura especializada na área da oncologia e tecnologias médicas. Entre as bases selecionadas destacam-se:

- Base de dados multidisciplinar, que abrange artigos nas áreas de saúde, tecnologia e biologia molecular.
- Base específica em ciências da saúde, que inclui publicações em oncologia, diagnóstico por imagem e bioquímica clínica.

- Bases especializadas em literatura biomédica e tecnológica, que apresentam estudos recentes sobre inovação e aplicação clínica.

A busca foi conduzida utilizando palavras-chave e termos relacionados ao tema, combinados por operadores booleanos para otimizar os resultados. Entre os termos principais empregados estavam: “diagnóstico precoce do câncer”, “tecnologias de imagem”, “biomarcadores”, “sensibilidade diagnóstica”, “imagens médicas avançadas”, “biomarcadores moleculares”, “detecção precoce de tumores” e suas variações em inglês. Para garantir a exaustividade, a busca foi complementada com a análise das referências bibliográficas dos artigos selecionados, o que permitiu identificar estudos adicionais relevantes que inicialmente não apareceram nas buscas diretas.¹³

2.4 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ARTIGOS

O processo de seleção dos estudos foi conduzido em três fases, com o objetivo de garantir rigor metodológico e minimizar possíveis vieses. Na primeira fase, procedeu-se à triagem inicial dos títulos e resumos das publicações retornadas na busca, eliminando-se aqueles que claramente não atendiam aos critérios de inclusão estabelecidos. Essa etapa permitiu uma redução significativa do número de estudos, direcionando a análise para os artigos mais alinhados ao escopo da revisão. Na segunda fase, foram avaliados os textos completos dos artigos previamente selecionados. Essa etapa envolveu uma leitura minuciosa para confirmar a relevância do conteúdo, a qualidade metodológica e a aderência ao tema do diagnóstico precoce, com ênfase em tecnologias de imagem e biomarcadores de alta sensibilidade. Durante essa análise, foram registrados os principais dados de interesse, tais como o tipo de tecnologia abordada, os resultados obtidos, as limitações identificadas e as recomendações dos autores. Por fim, na terceira fase, realizou-se a síntese crítica dos estudos incluídos, organizando as informações de forma a construir uma visão consolidada dos avanços e desafios na área. Essa etapa envolveu a categorização dos achados em grupos temáticos, tecnologias de imagem e biomarcadores, bem como a comparação entre diferentes abordagens, com o intuito de identificar tendências emergentes e lacunas na literatura científica atual.¹⁴

2.5 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

A análise dos dados foi conduzida de forma qualitativa, com o propósito de extrair as informações mais relevantes para a compreensão dos avanços no diagnóstico precoce do câncer. No que se refere às tecnologias de imagem, a avaliação considerou aspectos como capacidade de resolução, sensibilidade, especificidade, aplicabilidade clínica, custo, grau de invasividade e potencial para a detecção precoce de diferentes tipos de neoplasias. Quanto aos biomarcadores, foram analisados critérios como tipo molecular, origem biológica, métodos de detecção, sensibilidade, especificidade e aplicabilidade prática, especialmente no contexto de testes não invasivos, como exames de sangue ou

de outros fluidos corporais. Adicionalmente, foram identificados os principais desafios relacionados à implementação clínica dessas tecnologias, incluindo limitações técnicas, necessidade de padronização, variabilidade biológica interindividual e impacto econômico. Por fim, discutiram-se as perspectivas futuras indicadas pelos estudos revisados, com destaque para o uso de inteligência artificial na análise integrada de dados, o desenvolvimento de plataformas multiplex para a detecção simultânea de múltiplos biomarcadores, bem como inovações em técnicas de imagem funcional e molecular.¹⁵

2.6 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Embora esta revisão seja fundamentada em literatura secundária, foram rigorosamente observados os princípios éticos relacionados à honestidade intelectual, ao respeito pelos trabalhos dos autores originais e ao rigor metodológico na condução da pesquisa, de modo a minimizar vieses na seleção e interpretação dos dados. A transparência na descrição dos procedimentos metodológicos visa assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados apresentados. Entre as limitações inerentes à metodologia de revisão bibliográfica, destaca-se a possibilidade de viés na seleção dos artigos, considerando que as escolhas das bases de dados, dos descritores e dos critérios de inclusão e exclusão podem influenciar significativamente os achados. Além disso, a ausência de dados primários e a dependência da qualidade metodológica dos estudos previamente publicados impactam diretamente o nível de evidência disponível. Outra limitação relevante refere-se à rápida evolução das tecnologias no campo do diagnóstico oncológico, o que pode tornar alguns achados obsoletos em curto espaço de tempo, exigindo revisões periódicas para garantir a atualidade e a relevância científica do conteúdo.¹⁶

2.7 ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A organização dos resultados desta revisão foi cuidadosamente planejada para facilitar a compreensão dos avanços tecnológicos e de suas implicações clínicas. Os achados foram estruturados em seções específicas, abordando separadamente as tecnologias de imagem e os biomarcadores de alta sensibilidade, com subseções dedicadas às diferentes técnicas e suas respectivas aplicações no diagnóstico precoce do câncer. Além disso, foram destacados aspectos relacionados à integração dessas tecnologias, aos desafios enfrentados na prática clínica e às perspectivas futuras, com o intuito de oferecer uma visão abrangente e crítica do cenário atual. A apresentação dos resultados buscou preservar a clareza, a objetividade e a coerência, visando facilitar a leitura e o entendimento tanto por profissionais da área da saúde quanto por pesquisadores interessados no tema.¹⁷

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão bibliográfica realizada evidenciou avanços significativos em duas frentes fundamentais para o diagnóstico precoce do câncer: as novas tecnologias de imagem e o

desenvolvimento de biomarcadores de alta sensibilidade. Tais inovações não apenas ampliam a capacidade de detecção precoce da doença, como também proporcionam maior precisão diagnóstica e riqueza de informações, favorecendo estratégias terapêuticas mais individualizadas e eficazes no contexto oncológico. A seguir, são apresentados e discutidos os principais achados da literatura, organizados em categorias temáticas que refletem as diferentes abordagens tecnológicas analisadas.¹⁸

3.1 NOVAS TECNOLOGIAS DE IMAGEM: AVANÇOS E POTENCIALIDADES

As tecnologias de imagem médica passaram por uma evolução notável nas últimas décadas, incorporando recursos que elevaram significativamente a capacidade diagnóstica precoce dos tumores. Entre as modalidades de maior destaque estão a tomografia computadorizada (TC) de alta resolução, a ressonância magnética (RM) funcional, a tomografia por emissão de pósitrons combinada com TC (PET-CT) e técnicas emergentes, como a tomografia óptica e a imagem molecular.¹⁹

A tomografia computadorizada de alta resolução possibilita a obtenção de imagens detalhadas em cortes finos, facilitando a detecção de lesões de pequeno volume que, anteriormente, poderiam passar despercebidas. O aprimoramento dos detectores e a redução da dose de radiação tornaram essa técnica mais segura e viável para o rastreamento em populações de risco, como fumantes na triagem para câncer de pulmão. Ademais, o desenvolvimento de protocolos específicos para diferentes tipos de câncer permitiu otimizar a qualidade das imagens e reduzir o tempo dos exames, aspectos cruciais para sua aplicabilidade clínica em larga escala.²⁰

A ressonância magnética funcional tem se destacado por fornecer informações não apenas anatômicas, mas também funcionais e metabólicas dos tecidos, o que é fundamental para a diferenciação entre lesões benignas e malignas, bem como para a avaliação da agressividade tumoral. Técnicas como a espectroscopia por RM, difusão e perfusão permitem avaliar a composição química, o fluxo sanguíneo e a integridade celular das estruturas suspeitas. Esse conjunto de informações contribui para uma avaliação diagnóstica mais precisa e precoce, especialmente em órgãos como o cérebro, fígado e mama.²²

A PET-CT representa um avanço revolucionário ao integrar a imagem anatômica da TC com a funcionalidade metabólica do PET, que utiliza radiofármacos específicos para detectar alterações metabólicas típicas de células neoplásicas. Trata-se de uma técnica extremamente sensível, empregada não apenas no diagnóstico, mas também no estadiamento e no monitoramento terapêutico. A capacidade de identificar áreas de alta atividade metabólica antes mesmo da manifestação estrutural da lesão amplia significativamente o potencial de detecção precoce, sobretudo em tumores de difícil visualização por métodos convencionais.²³

Entre as tecnologias emergentes, destaca-se a tomografia óptica, que utiliza luz para captar alterações teciduais em nível celular e molecular, com potencial aplicação em biópsias ópticas e em

imagens em tempo real durante procedimentos cirúrgicos. Já a imagem molecular visa detectar moléculas específicas associadas à presença tumoral, integrando recursos de imagem com a biologia molecular para identificar neoplasias em estágios iniciais e monitorar alterações ao longo do tempo.²⁴

Apesar dos avanços significativos, essas tecnologias ainda enfrentam desafios para sua ampla incorporação na prática clínica. O custo elevado dos equipamentos e exames, a necessidade de profissionais altamente especializados e a complexidade na interpretação dos dados representam barreiras importantes, especialmente em contextos de saúde pública e em regiões com infraestrutura limitada. Além disso, a padronização dos protocolos de imagem e a validação clínica contínua são fundamentais para assegurar a qualidade, reprodutibilidade e confiabilidade dos diagnósticos obtidos por meio dessas ferramentas.²⁵

3.2 BIOMARCADORES DE ALTA SENSIBILIDADE: POTENCIAL DIAGNÓSTICO E DESAFIOS

O desenvolvimento de biomarcadores de alta sensibilidade representa uma das áreas mais promissoras para o diagnóstico precoce do câncer, oferecendo uma abordagem complementar e, em certos casos, superior às limitações das técnicas de imagem. Biomarcadores são substâncias ou características mensuráveis associadas à presença, progressão ou comportamento tumoral, detectáveis em fluidos corporais como sangue, urina, saliva ou em amostras de tecido. Os biomarcadores moleculares, que incluem fragmentos de DNA tumoral circulante, RNA, proteínas específicas, células tumorais circulantes e metabólitos, têm sido objeto de intensa investigação. Graças aos avanços em técnicas como PCR digital, sequenciamento de nova geração (NGS) e imunocromatografia de alta sensibilidade, tornou-se possível detectar esses sinais moleculares em concentrações extremamente baixas, permitindo identificar o câncer mesmo antes do surgimento de manifestações clínicas ou radiológicas.²⁶

Um dos principais benefícios dos biomarcadores é a viabilidade de exames não invasivos ou minimamente invasivos, o que facilita tanto o rastreamento populacional quanto o monitoramento contínuo de pacientes em grupos de risco. Essa vantagem é particularmente relevante em neoplasias cuja biópsia convencional é tecnicamente difícil ou representa riscos significativos. Além disso, a análise integrada de múltiplos biomarcadores pode aumentar substancialmente a precisão diagnóstica, reduzindo a incidência de falsos positivos e falsos negativos, desafios ainda frequentes nos métodos atuais. Contudo, a heterogeneidade biológica dos tumores constitui um obstáculo importante para a padronização e aplicação clínica desses biomarcadores. Diferentes tipos e subtipos de câncer apresentam perfis moleculares diversos, dificultando a definição de marcadores universais. Adicionalmente, fatores individuais dos pacientes, como condições inflamatórias, comorbidades e

variações genéticas, podem interferir na expressão e na interpretação dos biomarcadores, exigindo o uso de algoritmos analíticos cada vez mais robustos e personalizados.²⁷

Outro aspecto crítico está relacionado à validação clínica dos biomarcadores. Para que esses indicadores sejam incorporados de forma segura e eficaz à prática médica, é necessário que sejam submetidos a estudos rigorosos que comprovem sua sensibilidade, especificidade, reprodutibilidade e impacto clínico positivo. Embora muitos biomarcadores promissores estejam em fase experimental ou em validação, ainda há um caminho considerável a ser percorrido até que se tornem parte da rotina diagnóstica oncológica.²⁸

4 CONCLUSÃO

Os avanços nas tecnologias de imagem e no desenvolvimento de biomarcadores de alta sensibilidade têm revolucionado o campo do diagnóstico precoce do câncer, abrindo novas perspectivas para uma detecção mais rápida, precisa e menos invasiva da doença. As técnicas de imagem modernas possibilitam uma visualização detalhada, anatômica e funcional dos tecidos, permitindo a identificação de lesões ainda em estágios iniciais. Paralelamente, os biomarcadores oferecem uma abordagem complementar, baseada na detecção de sinais moleculares presentes em fluidos corporais, o que amplia a sensibilidade e a especificidade diagnóstica.

A integração dessas duas frentes, imagem e biomarcadores, aliada ao uso crescente de ferramentas de inteligência artificial e análise de dados multidimensionais, configura-se como um marco na evolução da medicina personalizada aplicada ao câncer. Essa convergência tecnológica potencializa não apenas a acurácia diagnóstica, mas também a possibilidade de intervenções mais precoces, direcionadas e eficazes, contribuindo para a melhoria dos prognósticos e a redução da mortalidade oncológica.

Apesar dos avanços significativos, persistem desafios relevantes, como a necessidade de validação clínica robusta, a redução de custos, a capacitação de profissionais e a criação de políticas públicas que garantam o acesso equitativo a essas inovações. A rápida evolução tecnológica impõe também a atualização contínua de protocolos clínicos e exige atenção especial à segurança, ética e privacidade no manejo dos dados dos pacientes.

Dessa forma, os avanços em tecnologias de imagem e biomarcadores consolidam uma nova era na oncologia diagnóstica, marcada por maior precisão, menor invasividade e intervenções terapêuticas mais precoces. O fortalecimento de políticas públicas, a validação clínica rigorosa e o acesso equitativo a essas tecnologias são fatores determinantes para sua implementação eficaz nos sistemas de saúde. Investimentos contínuos em pesquisa e inovação, aliados à capacitação profissional e à modernização da infraestrutura diagnóstica, serão fundamentais para viabilizar a incorporação dessas ferramentas de forma segura, ética e sustentável. Assim, a medicina oncológica caminha para



uma abordagem cada vez mais integrada, personalizada e centrada no paciente, com impacto significativo na detecção, no tratamento e na sobrevida dos indivíduos acometidos pela doença.

REFERÊNCIAS

- Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin*. 2021;71(3):209–49. doi:10.3322/caac.21660.
- Montagnana M, Lippi G. Cancer diagnostics: current concepts and future perspectives. *Ann Transl Med*. 2017;5(13):268. doi:10.21037/atm.2017.06.20.
- Tempany CM, Jayender J, Kapur T, Bueno R, Golby A, Agar N, et al. Multimodal imaging for improved diagnosis and treatment of cancers. *Cancer*. 2015;121(6):817–27. doi:10.1002/cncr.29012.
- Frangioni JV. New technologies for human cancer imaging. *J Clin Oncol*. 2008;26(24):4012–21. doi:10.1200/JCO.2007.14.3065.
- Medina-Lara A, Grigore B, Lewis R, Peters J, Price S, Landa P, et al. Cancer diagnostic tools to aid decision-making in primary care: mixed-methods systematic reviews and cost-effectiveness analysis. *Health Technol Assess*. 2020;24(66):1–332. doi:10.3310/hta24660.
- Fass L. Imaging and cancer: a review. *Mol Oncol*. 2008;2(2):115–52. doi:10.1016/j.molonc.2008.04.001.
- Tatro D. The mathematics of cancer: fitting the Gompertz equation to tumor growth. Senior Projects Spring 2018. Bard Digital Commons; 2018. Available from: https://digitalcommons.bard.edu/senproj_s2018/147.
- Bi WL, Hosny A, Schabath MB, Giger ML, Birkbak NJ, Mehrtash A, et al. Artificial intelligence in cancer imaging: clinical challenges and applications. *CA Cancer J Clin*. 2019;69(2):127–57. doi:10.3322/caac.21552.
- Lopci E, Nanni C, Castellucci P, Zamarchi R, Chondrogiannis S, Fanti S. PET radiopharmaceuticals beyond [18F]FDG in oncology: a review. *Insights Imaging*. 2010;1(5–6):373–85. doi:10.1007/s13244-010-0042-5.
- Meghizfene A, Dance DR, McLean D, Kramer HM. Dosimetry in diagnostic radiology: an overview. *Eur J Radiol*. 2010;76(1):11–4. doi:10.1016/j.ejrad.2010.06.034.
- Madireddy S, Verma A, Dwarakanath BS, Papineni RVL. Technological advances in cancer brachytherapy. *Phys Open*. 2022;11:100109. doi:10.1016/j.physo.2022.100109.
- Raza F, Zafar H, You X, Khan A, Wu J, Ge L. Cancer nanomedicine: focus on recent developments and self-assembled peptide nanocarriers. *J Mater Chem B*. 2019;7(48):7639–55. doi:10.1039/C9TB01850C.
- Walter W, Pfarr N, Meggendorfer M, Jost P, Haferlach T, Weichert W. Next-generation diagnostics for precision oncology: pre-analytical considerations, technical challenges, and available technologies. *Semin Cancer Biol*. 2022;84:3–15. doi:10.1016/j.semcancer.2021.06.002.
- Tettero JM, Freeman S, Buecklein V, van der Velden VHJ, Schuurhuis GJ, Ossenkoppele GJ, et al. Technical aspects of flow cytometry-based measurable residual disease quantification in acute myeloid leukemia: experience of the European LeukemiaNet MRD Working Party. *HemaSphere*. 2022;6(1):e676. doi:10.1097/HS9.0000000000000676.

- Gupta S, Gupta MK, Shabaz M, Sharma A. Deep learning techniques for cancer classification using microarray gene expression data. *Front Physiol.* 2022;13:952709. doi:10.3389/fphys.2022.952709.
- Creytens D. Molecular classification of soft tissue and bone tumors. *Diagnostics (Basel).* 2021;11(12):2326. doi:10.3390/diagnostics11122326.
- Ahmad-Nejad P, Ashavaid T, Vacaflares Salinas A, et al. Current and future challenges in quality assurance for molecular diagnostics. *Clin Chim Acta.* 2021;519:239–46. doi:10.1016/j.cca.2021.04.031.
- Mattocks CJ, Morris MA, Matthijs G, Swinnen E, Corveleyn A, Dequeker E, et al. A standardized framework for the validation and verification of clinical molecular genetic tests. *Eur J Hum Genet.* 2010;18(12):1276–88. doi:10.1038/ejhg.2010.101.
- Normanno N, Rachiglio AM, Roma C, Fenizia F, Esposito C, Pasquale R, et al. Molecular diagnostics and personalized medicine in oncology: challenges and opportunities. *J Cell Biochem.* 2013;114(3):514–24. doi:10.1002/jcb.24389.
- Mahfouz ME, Rodrigo JP, Takes RP, Rinaldo A, Devaney KO, Ferlito A. Current and future potential of molecular diagnostics in head and neck cancer. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2010;267(6):851–60. doi:10.1007/s00405-010-1194-2.
- Gambhir SS. Molecular imaging of cancer with positron emission tomography. *Nat Rev Cancer.* 2002;2(9):683–93. doi:10.1038/nrc882.
- Vaquero JJ, Kinahan P. Positron emission tomography: current challenges and opportunities for technological advances in clinical and preclinical imaging systems. *Annu Rev Biomed Eng.* 2015;17:385–414. doi:10.1146/annurev-bioeng-071114-040723.
- Hillner BE, Siegel BA, Liu D, Shields AF, Gareen IF, Hanna L, et al. Impact of positron emission tomography/computed tomography and positron emission tomography alone on expected management of patients with cancer: initial results from the National Oncologic PET Registry. *J Clin Oncol.* 2008;26(13):2155–61. doi:10.1200/JCO.2007.14.5631.
- Bockisch A, Freudenberg LS, Schmidt D, Kuwert T. Hybrid imaging by SPECT/CT and PET/CT: proven outcomes in cancer imaging. *Semin Nucl Med.* 2009;39(4):276–89. doi:10.1053/j.semnuclmed.2009.03.002.
- Jennings M, Marcu LG, Bezak E. PET-specific parameters and radiotracers in theoretical tumor modeling. *Comput Math Methods Med.* 2015;2015:1–11. doi:10.1155/2015/183139.
- Yoon J, Shin M, Lim J, Lee JY, Choi JW. Recent advances in MXene-based biosensors for cancer diagnosis. *Biosensors (Basel).* 2020;10(11):185. doi:10.3390/bios10110185.
- Miele E, Spinelli GP, Tomao F, Tomao S, Zullo A, D'Amico C, et al. Positron emission tomography (PET) radiotracers in oncology—utility of 18F-fluorodeoxyglucose (FDG)-PET in the treatment of patients with non-small-cell lung cancer (NSCLC). *J Exp Clin Cancer Res.* 2008;27(1):52. doi:10.1186/1756-9966-27-52.
- Griffeth LK. Use of PET/CT scanning in cancer patients: technical and practical considerations. *Proc (Bayl Univ Med Cent).* 2005;18(4):321–30. doi:10.1080/08998280.2005.11928002.