HOSPITAL DE CLÍNICAS DE PORTO ALEGRE
PROGRAMA DE RESIDÊNCIA MÉDICA EM CIRURGIA GERAL

HELENA MARGOT FLÔRES SOARES DA SILVA

Do PSA à precisão: o futuro do diagnóstico do câncer de próstata com IA, biomarcadores e imagem

Porto Alegre
2026

HELENA MARGOT FLÔRES SOARES DA SILVA

Do PSA à precisão: o futuro do diagnóstico do câncer de próstata com IA, biomarcadores e imagem

Trabalho de Conclusão de Residência apresentado ao Programa de Residência Médica do Hospital de Clínicas de Porto Alegre como requisito parcial para a obtenção do título de especialista em Cirurgia Geral.

Orientador(a): Guilherme Gonçalves Pretto
Coorientador(a): Juan Gómez Rivas

Porto Alegre

2026

CIP - Catalogação na Publicação

Flôres Soares da Silva, Helena Margot
Do PSA à precisão: o futuro do diagnóstico do câncer de próstata com IA, biomarcadores e imagem / Helena Margot Flôres Soares da Silva. -- 2026.
27 f.
Orientador: Guilherme Gonçalves Pretto.

Coorientador: Juan Gómez Rivas.

Trabalho de conclusão de curso (Especialização) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Medicina, Programa de Residência Médica em Cirurgia Geral, Porto Alegre, BR-RS, 2026.

1. Câncer de próstata. 2. Diagnóstico médico. 3. Inteligência artificial na medicina. 4. Biomarcadores. 5. Imagem por ressonância magnética. I. Gonçalves Pretto, Guilherme, orient. II. Gómez Rivas, Juan, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

À minha mãe, que esteve comigo em todos os caminhos, mesmo quando não era visível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, pela disponibilidade, pelas contribuições acadêmicas e pela confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para a construção crítica do conteúdo e para o amadurecimento científico ao longo da residência.

Aos colegas e professores do Programa de Residência, agradeço pelas trocas constantes, pelo aprendizado compartilhado e pelo ambiente estimulante, que contribuíram de forma decisiva para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço às instituições que fizeram parte da minha trajetória acadêmica e assistencial, em especial à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Hospital de Clínicas de Porto Alegre, pelo suporte, pela infraestrutura e pelas oportunidades de aprendizado oferecidas durante a residência.

Registro também meu agradecimento aos coautores do artigo que fundamenta este trabalho, pela colaboração científica, pelas discussões produtivas e pela construção conjunta do conhecimento.

Por fim, agradeço à minha família e às pessoas próximas, pelo apoio incondicional, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo constante ao longo dessa etapa tão exigente. Esse suporte foi essencial para que este percurso fosse possível.

RESUMO

O câncer de próstata é uma das neoplasias malignas mais prevalentes entre homens e representa um importante desafio em saúde pública. O diagnóstico dessa doença historicamente baseia-se na dosagem do antígeno prostático específico (PSA), que, apesar de sua ampla utilização e elevada sensibilidade, apresenta limitações relevantes relacionadas à baixa especificidade, ao sobrediagnóstico e ao sobretratamento. Nesse contexto, tornam-se necessárias estratégias diagnósticas mais precisas, capazes de identificar tumores clinicamente significativos e de subsidiar decisões terapêuticas individualizadas.

Este trabalho tem como objetivo analisar criticamente o papel da inteligência artificial (IA) e do *machine learning*, associados a biomarcadores e a métodos avançados de imagem, no diagnóstico do câncer de próstata, destacando sua contribuição para a estratificação de risco e para a transição de modelos diagnósticos centrados exclusivamente no PSA para abordagens multimodais de medicina de precisão.

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, baseada na análise qualitativa de estudos relevantes publicados em bases de dados científicas internacionais, incluindo artigos de revisão, estudos observacionais, ensaios clínicos, meta-análises e diretrizes. Foram abordadas as limitações do PSA como ferramenta diagnóstica isolada, os avanços proporcionados pela ressonância magnética multiparamétrica da próstata, as aplicações de modelos baseados em IA na análise de imagens e na patologia digital, bem como o uso de biomarcadores moleculares e genômicos integrados a modelos preditivos.

Os estudos analisados demonstram que a incorporação da IA à interpretação da ressonância magnética multiparamétrica melhora a detecção de lesões suspeitas, reduz a variabilidade interobservador e contribui para a identificação de tumores clinicamente significativos. Na patologia, algoritmos baseados em IA auxiliam na graduação de Gleason e aumentam a padronização diagnóstica. Além disso, modelos multimodais que integram dados clínicos, laboratoriais, de imagem e moleculares apresentam desempenho superior na estratificação de risco quando comparados às estratégias tradicionais baseadas exclusivamente no PSA, contribuindo para a redução de biópsias desnecessárias.

Conclui-se que o diagnóstico do câncer de próstata encontra-se em um processo de transição em direção a abordagens integrativas e personalizadas. Estratégias multimodais baseadas em IA atuam como ferramentas complementares aos métodos diagnósticos tradicionais, com potencial para aumentar a acurácia diagnóstica, otimizar a tomada de decisão clínica e minimizar os riscos de sobrediagnóstico e sobretratamento. Contudo, a incorporação ampla

dessas tecnologias ainda depende de validação em larga escala, padronização metodológica e regulamentação adequada.
Palavras-chave: câncer de próstata; antígeno prostático específico; inteligência artificial; *machine learning*; diagnóstico multimodal.

ABSTRACT

Prostate cancer is one of the most prevalent malignancies among men and represents a major public health challenge worldwide. The diagnosis of this disease has historically relied on serum prostate-specific antigen (PSA) testing, which, despite its widespread use and high sensitivity, presents relevant limitations related to low specificity, overdiagnosis, and overtreatment. In this context, more accurate diagnostic strategies are required to identify clinically significant tumors and to support individualized therapeutic decision-making.

The aim of this study is to critically analyze the role of artificial intelligence (AI) and machine learning, in association with biomarkers and advanced imaging methods, in the diagnosis of prostate cancer, highlighting their contribution to risk stratification and to the transition from PSA-centered diagnostic models toward multimodal approaches in precision medicine.

This work consists of a narrative review of the literature, based on the qualitative analysis of relevant studies published in international scientific databases, including review articles, observational studies, clinical trials, meta-analyses, and clinical guidelines. The review addresses the limitations of PSA as an isolated diagnostic tool, advances provided by multiparametric prostate magnetic resonance imaging, applications of AI-based models in imaging analysis and digital pathology, and the use of molecular and genomic biomarkers integrated into predictive frameworks.

The analyzed studies demonstrate that the incorporation of AI into the interpretation of multiparametric magnetic resonance imaging improves the detection of suspicious lesions, reduces interobserver variability, and contributes to the identification of clinically significant tumors. In pathology, AI-driven algorithms assist in Gleason grading and increase diagnostic standardization. Furthermore, multimodal models integrating clinical, laboratory, imaging, and molecular data show superior performance in risk stratification when compared to traditional strategies based solely on PSA, contributing to a reduction in unnecessary biopsies.

It is concluded that prostate cancer diagnosis is undergoing a transition toward integrative and personalized approaches. AI-based multimodal strategies act as complementary tools to traditional diagnostic methods, with the potential to improve diagnostic accuracy, optimize clinical decision-making, and minimize the risks of overdiagnosis and overtreatment. However, their widespread implementation still depends on large-scale validation, methodological standardization, and appropriate regulatory frameworks.

Keywords: prostate cancer; prostate-specific antigen; artificial intelligence; machine learning; multimodal diagnosis.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IA – Inteligência artificial

mpMRI – *Multiparametric Magnetic Resonance Imaging* (ressonância magnética multiparamétrica)

MRI – *Magnetic Resonance Imaging* (ressonância magnética)

PI-RADS – *Prostate Imaging Reporting and Data System*

PSA – *Prostate-Specific Antigen* (antígeno prostático específico)

SEER – *Surveillance, Epidemiology, and End Results Program*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 JUSTIFICATIVA 12
1.2 OBJETIVOS 13
2 REVISÃO DA LITERATURA 14
3 MÉTODOS 17
4 ARTIGO 18
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 19
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 21
REFERÊNCIAS 22

1 INTRODUÇÃO

O câncer de próstata é uma das neoplasias malignas mais prevalentes entre homens em todo o mundo e representa importante causa de morbimortalidade, especialmente em países com populações envelhecidas. O diagnóstico e o rastreamento dessa neoplasia historicamente se basearam, de forma predominante, na dosagem sérica do antígeno prostático específico (prostate-specific antigen – PSA), que permanece até hoje como o principal biomarcador utilizado na prática clínica. A introdução do PSA na década de 1990 marcou uma mudança significativa no cenário do câncer de próstata, contribuindo para o diagnóstico mais precoce da doença e para a redução das taxas de mortalidade associadas.

Apesar de sua ampla utilização, o PSA apresenta limitações relevantes, principalmente relacionadas à sua baixa especificidade. Níveis elevados podem estar associados a condições benignas, como hiperplasia prostática benigna e prostatite, o que resulta em altas taxas de biópsias desnecessárias. Além disso, o rastreamento baseado exclusivamente no PSA está associado ao risco de sobrediagnóstico e sobretratamento, uma vez que muitos tumores prostáticos apresentam comportamento indolente e não impactariam a sobrevida do paciente. Esses fatores levantam questionamentos importantes sobre a relação risco-benefício das estratégias tradicionais de diagnóstico e reforçam a necessidade de abordagens mais precisas para a estratificação de risco.

Nesse contexto, avanços tecnológicos recentes vêm transformando progressivamente o diagnóstico do câncer de próstata. A incorporação da ressonância magnética multiparamétrica da próstata ampliou a capacidade de detecção de tumores clinicamente significativos e permitiu melhor caracterização das lesões suspeitas. Paralelamente, o desenvolvimento de novos biomarcadores moleculares e genômicos trouxe novas possibilidades para a avaliação do risco individual e para a personalização da tomada de decisão clínica.

A inteligência artificial (IA) e o *machine learning* emergem como ferramentas centrais nesse novo paradigma diagnóstico. Essas tecnologias permitem a análise integrada de grandes volumes de dados clínicos, laboratoriais, de imagem e histopatológicos, identificando padrões que muitas vezes não são perceptíveis à avaliação humana isolada. Aplicações da IA já demonstram benefícios na interpretação da ressonância magnética, na patologia digital, na segmentação prostática, na graduação de Gleason e na construção de modelos preditivos multimodais, contribuindo para maior acurácia diagnóstica e redução de intervenções desnecessárias.

Dessa forma, observa-se uma transição gradual de um modelo diagnóstico centrado exclusivamente no PSA para abordagens mais abrangentes, que integram biomarcadores, métodos avançados de imagem e inteligência artificial. Essa mudança representa um passo importante em direção à medicina de precisão, com potencial para melhorar a estratificação de risco, otimizar a indicação de biópsias e tratamentos e, consequentemente, impactar positivamente os desfechos clínicos e a qualidade de vida dos pacientes.

1.1 Justificativa

A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho fundamenta-se na relevância clínica, científica e tecnológica do tema abordado. O câncer de próstata continua sendo um importante problema de saúde pública, e as limitações das estratégias diagnósticas tradicionais ainda geram desafios significativos na prática urológica cotidiana. A necessidade de equilibrar o diagnóstico precoce de tumores clinicamente significativos com a redução do sobrediagnóstico e do sobretratamento torna-se cada vez mais evidente.

O rápido avanço da inteligência artificial aplicada à medicina, aliado ao crescente volume de dados clínicos e de imagem disponíveis, cria um cenário propício para o desenvolvimento de modelos diagnósticos mais precisos e personalizados. No entanto, a incorporação dessas tecnologias na prática clínica ainda enfrenta desafios relacionados à validação científica, padronização dos métodos, interpretação dos resultados e questões éticas e regulatórias. Assim, torna-se fundamental compreender de forma crítica o papel atual e futuro da inteligência artificial, dos biomarcadores e das técnicas de imagem no diagnóstico do câncer de próstata.

Além disso, a integração dessas ferramentas em modelos multimodais representa uma mudança conceitual relevante, exigindo atualização constante dos profissionais de saúde e reflexão sobre o impacto dessas inovações na tomada de decisão clínica. A análise sistematizada das evidências disponíveis contribui para esclarecer os benefícios, limitações e perspectivas dessas abordagens, auxiliando na transição segura e racional para modelos diagnósticos mais avançados.

Nesse sentido, este trabalho justifica-se por reunir e discutir criticamente os principais avanços relacionados ao uso da inteligência artificial, de biomarcadores e de métodos de imagem no diagnóstico do câncer de próstata, destacando seu papel complementar ao PSA. A abordagem adotada busca contribuir para a formação acadêmica e profissional na área da urologia, além de fornecer subsídios teóricos para a prática clínica baseada em evidências e para o desenvolvimento futuro de estratégias diagnósticas mais precisas e personalizadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar criticamente o papel da inteligência artificial e do *machine learning*, associados a biomarcadores e métodos avançados de imagem, no diagnóstico do câncer de próstata, destacando sua contribuição para a estratificação de risco, a redução de biópsias desnecessárias e a transição de modelos diagnósticos centrados no PSA para abordagens multimodais de medicina de precisão.

1.2.2 Objetivos específicos

Descrever as principais limitações do uso isolado do antígeno prostático específico (PSA) no rastreamento e diagnóstico do câncer de próstata, com ênfase no sobrediagnóstico e no sobretratamento.

Revisar as aplicações da inteligência artificial e do *machine learning* na interpretação da ressonância magnética multiparamétrica da próstata, incluindo detecção de lesões, segmentação prostática e avaliação da agressividade tumoral.

Analisar o papel da inteligência artificial na patologia digital, especialmente na graduação de Gleason, na padronização diagnóstica e no apoio à tomada de decisão clínica.

Avaliar a utilização de biomarcadores moleculares e genômicos, isoladamente e em combinação com ferramentas de inteligência artificial, na estratificação de risco e no manejo individualizado do câncer de próstata.

Discutir os benefícios e limitações dos modelos diagnósticos multimodais que integram dados clínicos, laboratoriais, de imagem e moleculares, com foco na melhoria da acurácia diagnóstica e na redução de intervenções invasivas desnecessárias.

Abordar os desafios técnicos, éticos e regulatórios relacionados à implementação clínica da inteligência artificial no diagnóstico do câncer de próstata.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Limitações do diagnóstico baseado no antígeno prostático específico

O antígeno prostático específico consolidou-se como o principal biomarcador utilizado no rastreamento e no diagnóstico inicial do câncer de próstata. Embora apresente elevada sensibilidade para a detecção da doença, sua baixa especificidade representa uma limitação significativa, uma vez que níveis elevados podem estar associados a condições benignas, como hiperplasia prostática benigna e prostatite. Essa característica resulta em altas taxas de resultados falso-positivos e, consequentemente, em biópsias prostáticas desnecessárias.

Além disso, o uso isolado do PSA está fortemente relacionado ao sobrediagnóstico de tumores de baixo risco, muitos dos quais apresentam comportamento indolente e não impactariam a sobrevida do paciente. O sobretratamento decorrente desse cenário pode acarretar efeitos adversos importantes, incluindo disfunção sexual, alterações urinárias e comprometimento da qualidade de vida. Dessa forma, torna-se evidente que o PSA, embora fundamental, não deve ser utilizado como ferramenta diagnóstica exclusiva, reforçando a necessidade de estratégias complementares mais precisas para a estratificação de risco.

2.2 Avanços na imagem: ressonância magnética multiparamétrica da próstata

A ressonância magnética multiparamétrica da próstata (mpMRI) representa um marco importante na evolução do diagnóstico do câncer de próstata. A combinação de sequências anatômicas e funcionais permite a identificação mais acurada de lesões clinicamente significativas, além de auxiliar na caracterização tumoral e no planejamento de biópsias direcionadas.

Apesar de seus benefícios, a mpMRI apresenta limitações relacionadas à variabilidade nos protocolos de aquisição, à dependência da experiência do radiologista e à heterogeneidade na interpretação dos achados. Essas limitações podem resultar em inconsistências interobservador e impactar a reprodutibilidade dos resultados. Assim, embora a mpMRI tenha ampliado significativamente a capacidade diagnóstica, ainda há espaço para aprimoramentos que reduzam a subjetividade e aumentem a padronização da interpretação das imagens.

2.3 Inteligência artificial e *machine learning* aplicados à imagem

A aplicação da inteligência artificial e do *machine learning* na análise de imagens médicas tem demonstrado grande potencial no diagnóstico do câncer de próstata. Algoritmos baseados nessas tecnologias são capazes de identificar padrões complexos em imagens de

mpMRI, auxiliando na detecção de lesões, segmentação prostática e estimativa da agressividade tumoral.

Estudos demonstram que sistemas baseados em *machine learning* podem atingir níveis de acurácia comparáveis ou superiores aos métodos tradicionais de interpretação radiológica, além de contribuir para a redução da variabilidade interobservador. A automação de tarefas como segmentação e classificação de lesões também permite maior eficiência no fluxo de trabalho clínico, favorecendo a padronização dos resultados e a integração desses dados em modelos preditivos mais amplos.

2.4 Inteligência artificial na patologia e biomarcadores

Na patologia digital, a inteligência artificial tem sido utilizada para aprimorar a análise histopatológica, especialmente na graduação de Gleason. Algoritmos treinados para avaliar lâminas digitalizadas podem atuar como ferramentas de suporte à decisão, aumentando a consistência diagnóstica e reduzindo a variabilidade entre patologistas.

Paralelamente, o desenvolvimento de biomarcadores moleculares e genômicos ampliou as possibilidades de estratificação de risco no câncer de próstata. A integração desses biomarcadores com ferramentas de inteligência artificial permite a construção de modelos mais precisos, capazes de prever o comportamento tumoral e orientar decisões terapêuticas individualizadas. Essa abordagem reforça o conceito de medicina de precisão, no qual o tratamento é adaptado às características biológicas específicas de cada paciente.

2.5 Modelos multimodais e medicina de precisão

Modelos diagnósticos multimodais representam a convergência entre dados clínicos, laboratoriais, de imagem e moleculares, integrados por meio de inteligência artificial. Esses modelos demonstram desempenho superior em comparação às estratégias baseadas exclusivamente no PSA, especialmente na identificação de tumores clinicamente significativos e na redução de biópsias desnecessárias.

A utilização de abordagens multimodais permite uma avaliação mais abrangente do paciente, considerando não apenas um único marcador, mas o conjunto de informações relevantes para a tomada de decisão clínica. Essa integração é fundamental para o avanço da medicina de precisão no câncer de próstata, possibilitando estratégias diagnósticas e terapêuticas mais individualizadas e eficazes.

2.6 Desafios, limitações e perspectivas futuras

Apesar dos avanços, a implementação clínica ampla da inteligência artificial no diagnóstico do câncer de próstata enfrenta desafios importantes. Entre eles, destacam-se a necessidade de validação externa em diferentes populações, a padronização dos métodos de aquisição e análise de dados, e as questões éticas e regulatórias relacionadas à transparência, responsabilidade e segurança dos algoritmos.

Além disso, fatores como custos, infraestrutura tecnológica e capacitação profissional podem limitar a adoção dessas ferramentas em determinados contextos. Assim, o futuro do diagnóstico do câncer de próstata depende não apenas do desenvolvimento tecnológico, mas também de estratégias que garantam acesso equitativo, regulamentação adequada e integração harmoniosa dessas inovações na prática clínica.

3 MÉTODOS

O presente trabalho consiste em uma **revisão narrativa da literatura** sobre o uso da inteligência artificial e do *machine learning*, associados a biomarcadores e métodos avançados de imagem, no diagnóstico do câncer de próstata.

A busca bibliográfica foi realizada de forma não sistemática, com o objetivo de identificar estudos relevantes e atualizados relacionados ao tema. Foram consultadas bases de dados científicas amplamente utilizadas na área da saúde, incluindo PubMed/MEDLINE, Scopus e Web of Science, bem como diretrizes e documentos de sociedades científicas relevantes.

Os termos de busca utilizados incluíram combinações das seguintes palavras-chave: *prostate cancer*, *prostate-specific antigen*, *artificial intelligence*, *machine learning*, *multiparametric magnetic resonance imaging*, *digital pathology*, *biomarkers* e *multimodal diagnosis*. A seleção dos estudos priorizou publicações em língua inglesa, com foco em artigos de revisão, estudos observacionais, ensaios clínicos, meta-análises e diretrizes publicadas preferencialmente nos últimos anos.

Foram incluídos estudos que abordavam a aplicação da inteligência artificial e do *machine learning* no diagnóstico, estratificação de risco e apoio à decisão clínica no câncer de próstata, bem como trabalhos que discutiam a integração dessas tecnologias com biomarcadores e métodos de imagem. Estudos considerados irrelevantes ao escopo do trabalho, duplicados ou com foco exclusivo em aspectos não relacionados ao diagnóstico foram excluídos.

A análise dos estudos selecionados foi conduzida de forma qualitativa, com síntese narrativa dos principais achados, enfatizando os avanços tecnológicos, benefícios clínicos, limitações e desafios associados à implementação dessas ferramentas na prática clínica. Os resultados foram organizados em eixos temáticos, de acordo com os objetivos do trabalho, permitindo uma abordagem integrativa e crítica da literatura disponível.

4 ARTIGO

O presente Trabalho de Conclusão de Residência inclui o artigo científico intitulado *From prostate-specific antigen to precision: the future of prostate cancer diagnosis with artificial intelligence, biomarkers, and imaging*, de autoria de Flôres Soares da Silva HM, Gómez Rivas J, Mata Déniz P, Marugán MJ, González-Santander C, Fernández Montarroso L, Galante I e Moreno Sierra J, publicado na revista *Current Urology*.

O artigo encontra-se redigido em língua inglesa e disponibilizado em sua versão integral conforme as políticas editoriais da revista. Em razão de questões relacionadas aos direitos autorais, o texto completo do artigo não foi reproduzido nesta seção, sendo apresentado separadamente no arquivo correspondente ao texto completo do trabalho, conforme orientações institucionais para disponibilização parcial do conteúdo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura evidencia uma transformação progressiva no paradigma diagnóstico do câncer de próstata, marcada pela transição de abordagens centradas exclusivamente no antígeno prostático específico para modelos integrativos que combinam inteligência artificial, *machine learning*, biomarcadores e métodos avançados de imagem. Os estudos revisados demonstram que essas estratégias multimodais oferecem maior acurácia diagnóstica e melhor estratificação de risco quando comparadas aos métodos tradicionais isolados.

Os resultados apontam que, embora o PSA continue desempenhando papel central como ferramenta inicial de rastreamento, seu uso isolado apresenta limitações importantes, sobretudo no que se refere à baixa especificidade e ao risco de sobrediagnóstico. A literatura é consistente ao demonstrar que a associação do PSA com outras ferramentas diagnósticas reduz significativamente o número de biópsias desnecessárias e melhora a identificação de tumores clinicamente significativos, contribuindo para decisões terapêuticas mais adequadas.

No âmbito da imagem, a ressonância magnética multiparamétrica consolidou-se como elemento fundamental no diagnóstico contemporâneo do câncer de próstata. A incorporação de algoritmos de inteligência artificial e *machine learning* à interpretação da mpMRI mostrou-se capaz de aumentar a sensibilidade e a reprodutibilidade na detecção de lesões suspeitas, além de auxiliar na segmentação prostática e na avaliação da agressividade tumoral. Esses achados sugerem que a inteligência artificial atua como ferramenta complementar ao radiologista, reduzindo a variabilidade interobservador e aprimorando a padronização dos resultados.

Na patologia, os resultados da literatura indicam que a inteligência artificial aplicada à análise de lâminas digitalizadas contribui para maior consistência na graduação de Gleason e no reconhecimento de padrões histológicos relevantes. O uso desses sistemas como suporte à decisão diagnóstica tem potencial para reduzir discrepâncias entre observadores e aumentar a confiabilidade da avaliação histopatológica, especialmente em cenários de maior complexidade diagnóstica.

A integração de biomarcadores moleculares e genômicos com ferramentas de inteligência artificial emerge como outro achado relevante. Modelos que incorporam dados genéticos, moleculares e clínicos demonstram desempenho superior na previsão do comportamento tumoral e na estratificação de risco individual. Esses resultados reforçam o papel da inteligência artificial como elemento central na consolidação da medicina de precisão

no câncer de próstata, permitindo abordagens mais personalizadas e alinhadas às características biológicas de cada paciente.

Apesar dos avanços observados, a discussão da literatura também evidencia limitações importantes. Muitos estudos apresentam heterogeneidade metodológica, populações restritas ou validação limitada a centros específicos, o que dificulta a generalização dos resultados. Além disso, questões relacionadas à padronização dos dados, à interpretabilidade dos algoritmos, aos custos envolvidos e às implicações éticas e regulatórias permanecem como desafios relevantes para a implementação ampla dessas tecnologias na prática clínica.

Assim, os resultados discutidos sugerem que a inteligência artificial e os modelos multimodais não substituem os métodos diagnósticos tradicionais, mas atuam como ferramentas complementares que ampliam sua eficácia. A incorporação dessas tecnologias deve ocorrer de forma gradual, crítica e baseada em evidências, respeitando os princípios de segurança, equidade e responsabilidade clínica. O equilíbrio entre inovação tecnológica e aplicabilidade clínica prática é essencial para que os benefícios observados na literatura se traduzam em melhorias reais no cuidado ao paciente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O diagnóstico do câncer de próstata encontra-se em um processo de transição, no qual abordagens tradicionalmente centradas no antígeno prostático específico vêm sendo progressivamente complementadas por ferramentas diagnósticas mais avançadas. A literatura analisada demonstra que a integração da inteligência artificial e do *machine learning* com biomarcadores e métodos de imagem representa um avanço significativo na busca por maior acurácia diagnóstica e melhor estratificação de risco.

Os achados reforçam que o PSA permanece como elemento fundamental no rastreamento inicial da doença, porém apresenta limitações importantes quando utilizado de forma isolada. A associação com a ressonância magnética multiparamétrica, biomarcadores moleculares e algoritmos baseados em inteligência artificial possibilita a identificação mais precisa de tumores clinicamente significativos, contribuindo para a redução de biópsias desnecessárias e do sobretratamento, além de favorecer decisões terapêuticas mais individualizadas.

A inteligência artificial mostrou-se particularmente promissora tanto na interpretação de imagens quanto na patologia digital, atuando como ferramenta de apoio à decisão clínica e promovendo maior padronização e reprodutibilidade dos resultados. A utilização de modelos multimodais, capazes de integrar dados clínicos, laboratoriais, de imagem e moleculares, reforça o conceito de medicina de precisão e amplia as possibilidades de personalização do cuidado ao paciente com câncer de próstata.

Entretanto, a incorporação ampla dessas tecnologias na prática clínica ainda enfrenta desafios relevantes. A necessidade de validação em larga escala, a padronização dos métodos, a transparência dos algoritmos, os custos envolvidos e as questões éticas e regulatórias constituem fatores determinantes para sua implementação segura e equitativa. Dessa forma, a adoção da inteligência artificial deve ocorrer de maneira crítica, gradual e fundamentada em evidências científicas consistentes.

Por fim, conclui-se que o futuro do diagnóstico do câncer de próstata será moldado por abordagens integrativas e multimodais, nas quais a inteligência artificial atuará como elemento complementar aos métodos diagnósticos tradicionais. O desenvolvimento contínuo dessas estratégias, aliado à capacitação profissional e à regulamentação adequada, tem potencial para melhorar os desfechos clínicos e a qualidade de vida dos pacientes, consolidando um modelo diagnóstico mais preciso, racional e centrado no indivíduo.

REFERÊNCIAS

ALOWAIS, S. A. et al. Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice. *BMC Medical Education*, v. 23, n. 1, p. 689, 2023.

AMBROSINI, P. et al. Automated detection of cribriform growth patterns in prostate histology images. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 14904, 2020.

ARIF, M. et al. Clinically significant prostate cancer detection and segmentation in low-risk patients using a convolutional neural network on multiparametric MRI. *European Radiology*, v. 30, n. 12, p. 6582–6592, 2020.

AYUB, U. et al. A large language model (LLM)-based multi-agent framework for risk stratification and treatment recommendations in localized prostate cancer (locPCa). *Journal of Clinical Oncology*, v. 43, n. 16, supl., p. 5108, 2025.

BACCHETTI, E. et al. A deep learning model integrating clinical and MRI features improves risk stratification and reduces unnecessary biopsies in men with suspected prostate cancer. *Cancers*, v. 17, n. 13, p. 2257, 2025.

BAYERL, N. et al. Assessment of a fully automated diagnostic artificial intelligence software in prostate MRI: clinical evaluation and histopathological correlation. *European Journal of Radiology*, v. 181, p. 111790, 2024.

BERNATZ, S. et al. Epigenetic profiling of prostate cancer reveals potential prognostic signatures. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, v. 150, n. 8, p. 396, 2024.
BORGHESI, M. et al. Complications after systematic, random, and image-guided prostate biopsy. *European Urology*, v. 71, n. 3, p. 353–365, 2017.

BREHLER, M. et al. Difficulties and recommendations for AI-based prediction of prostate cancer aggressiveness in digital pathology. *Medical Research Archives*, v. 11, 2023.

CATALONA, W. J. History of the discovery and clinical translation of prostate-specific antigen. *Asian Journal of Urology*, v. 1, n. 1, p. 12–14, 2014.

CATALONA, W. J. et al. Comparison of digital rectal examination and serum prostate specific antigen in the early detection of prostate cancer: results of a multicenter clinical trial of 6,630 men. *Journal of Urology*, v. 151, n. 5, p. 1283–1290, 1994.

CATALONA, W. J. et al. Measurement of prostate-specific antigen in serum as a screening test for prostate cancer. *New England Journal of Medicine*, v. 324, n. 17, p. 1156–1161, 1991.

COSTI, C. G. et al. Urinary markers for prostate cancer: state of the art. *Applied Biosciences*, v. 4, n. 2, p. 24, 2025.

ESENGUR, O. T. et al. Multimodal approach to optimize biopsy decision-making for PI-RADS 3 lesions on multiparametric MRI. *Clinical Imaging*, v. 117, p. 110363, 2025.

ETZIONI, R. et al. Quantifying the role of PSA screening in the US prostate cancer mortality decline. *Cancer Causes & Control*, v. 19, n. 2, p. 175–181, 2007.

FOUTNZILAS, E. et al. Convergence of evolving artificial intelligence and machine learning techniques in precision oncology. *NPJ Digital Medicine*, v. 8, n. 1, p. 75, 2025.

GARVEY, B. et al. Clinical value of prostate segmentation and volume determination on MRI in benign prostatic hyperplasia. *Diagnostic and Interventional Radiology*, v. 20, n. 3, p. 229–233, 2014.

GUTMAN, A. B.; GUTMAN, E. B. An “acid” phosphatase occurring in the serum of patients with metastasizing carcinoma of the prostate gland. *Journal of Clinical Investigation*, v. 17, n. 4, p. 473–478, 1938.

GUTSCHE, R. et al. Multicentric 68Ga-PSMA PET radiomics for treatment response assessment of 177Lu-PSMA-617 radioligand therapy in patients with metastatic castration-resistant prostate cancer. *Frontiers in Nuclear Medicine*, v. 3, p. 1234853, 2023.

HACHEM, S. et al. Contemporary update on clinical and experimental prostate cancer biomarkers: a multi-omics-focused approach to detection and risk stratification. *Biology*, v. 13, n. 10, p. 762, 2024.

HEIJNSDIJK, E. A. et al. Quality-of-life effects of prostate-specific antigen screening. *New England Journal of Medicine*, v. 367, n. 7, p. 595–605, 2012.

ILIC, D. et al. Prostate cancer screening with prostate-specific antigen (PSA) test: a systematic review and meta-analysis. *BMJ*, v. 362, k3519, 2018.

JIN, Y. et al. Applications and prospects of spatial transcriptomics in prostate cancer research: a narrative review. *Current Urology*, v. 19, n. 5, p. 303–308, 2025.

KLOTZ, L. et al. Clinical results of long-term follow-up of a large, active surveillance cohort with localized prostate cancer. *Journal of Clinical Oncology*, v. 28, n. 1, p. 126–131, 2010.

KNEZEVIC, D. et al. Analytical validation of the Oncotype DX prostate cancer assay: a clinical RT-PCR assay optimized for prostate needle biopsies. *BMC Genomics*, v. 14, n. 1, p. 690, 2013.

LATCHAMSETTY, K. C. et al. Experience improves staging accuracy of endorectal magnetic resonance imaging in prostate cancer: what is the learning curve? *Canadian Journal of Urology*, v. 14, n. 1, p. 3429–3434, 2007.

LITJENS, G. et al. Evaluation of prostate segmentation algorithms for MRI: the PROMISE12 challenge. *Medical Image Analysis*, v. 18, n. 2, p. 359–373, 2014.

LOEB, S. et al. Complications following prostate biopsy: data from SEER-Medicare. *Journal of Urology*, v. 186, n. 5, p. 1830–1834, 2011.

LOJANAPIWAT, B. et al. Correlation and diagnostic performance of the prostate-specific antigen level with the diagnosis, aggressiveness, and bone metastasis of prostate cancer in clinical practice. *Prostate International*, v. 2, n. 3, p. 133–139, 2014.

MADALINSKA, J. B. et al. Health-related quality-of-life effects of radical prostatectomy and primary radiotherapy for screen-detected or clinically diagnosed localized prostate cancer. *Journal of Clinical Oncology*, v. 19, n. 6, p. 1619–1628, 2001.

MAZZONE, E. et al. Positive predictive value of prostate imaging reporting and data system version 2 for the detection of clinically significant prostate cancer: a systematic review and meta-analysis. *European Urology Oncology*, v. 4, n. 5, p. 697–713, 2021.

MENENGOLA, E.; GABARDO, E.; GONZÁLEZ SANMIGUEL, N. N. The proposal of the European regulation on artificial intelligence. *Sequência (Florianópolis)*, v. 43, n. 91, e91435, 2023.

MOLS, F. et al. Bowel, urinary, and sexual problems among long-term prostate cancer survivors: a population-based study. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, v. 73, n. 1, p. 30–38, 2009.

MOROZOV, A. et al. A systematic review and meta-analysis of artificial intelligence diagnostic accuracy in prostate cancer histology identification and grading. *Prostate Cancer and Prostatic Diseases*, v. 26, n. 4, p. 681–692, 2023.

MÜLLER, D. et al. DeepGleason: a system for automated Gleason grading of prostate cancer using deep neural networks. *arXiv*, 2024. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2403.16678v1. Acesso em: 30 mar. 2025.

OESTERLING, J. E. et al. Effect of cystoscopy, prostate biopsy, and transurethral resection of prostate on serum prostate-specific antigen concentration. *Urology*, v. 42, n. 3, p. 276–282, 1993.

PERERA, M. et al. PSA-based machine learning model improves prostate cancer risk stratification in a screening population. *World Journal of Urology*, v. 39, n. 6, p. 1897–1902, 2020.

QUANTITATION of prostate-specific antigen in serum by a sensitive enzyme immunoassay. *Cancer Research*, v. 40, n. 12, p. 4658–4662, 1980. Disponível em: https://aacrjournals.org/cancerres/. Acesso em: 27 mar. 2025.

ROIDOS, C. et al. Integration of genomic tests in prostate cancer care: implications for clinical practice and patient outcomes. *Current Issues in Molecular Biology*, v. 46, n. 12, p. 14408–14421, 2024.

SAHA, A. et al. Artificial intelligence and radiologists in prostate cancer detection on MRI (PI-CAI): an international, paired, non-inferiority, confirmatory study. *The Lancet Oncology*, v. 25, n. 7, p. 879–887, 2024.

SMITH, D. P. et al. Quality of life three years after diagnosis of localised prostate cancer: population-based cohort study. *BMJ*, v. 339, p. b4817, 2009.

SPRUATT, D. E. et al. An AI-derived digital pathology-based biomarker to predict the benefit of androgen deprivation therapy in localized prostate cancer with validation in NRG/RTOG 9408. *Journal of Clinical Oncology*, v. 40, n. 6, supl., p. 223, 2022.

STAMEY, T. A. et al. Prostate-specific antigen as a serum marker for adenocarcinoma of the prostate. *New England Journal of Medicine*, v. 317, n. 15, p. 909–916, 1987.

SUN, R. et al. Proteomic landscape profiling of primary prostate cancer reveals a 16-protein panel for prognosis prediction. *Cell Reports Medicine*, v. 5, n. 8, p. 101679, 2024.

THOMPSON, I. M. et al. Operating characteristics of prostate-specific antigen in men with an initial PSA level of 3.0 ng/mL or lower. *JAMA*, v. 294, n. 1, p. 66–70, 2005.

THOMPSON, I. M. et al. Prevalence of prostate cancer among men with a prostate-specific antigen level ≤ 4.0 ng per milliliter. *New England Journal of Medicine*, v. 350, n. 22, p. 2239–2246, 2004.

VILLA, M. et al. Integrative multi-omics analysis enables a comprehensive characterization of prostate cancer and unveils metastasis-associated candidate biomarkers. *Heliyon*, v. 11, n. 12, e43533, 2025.

WALDMAN, C. E. et al. Artificial intelligence in healthcare: a primer for medical education in radiomics. *Personalized Medicine*, v. 19, n. 5, p. 445–456, 2022.

WESSELS, F. et al. Artificial intelligence to predict oncological outcome directly from hematoxylin and eosin-stained slides in urology. *Minerva Urology and Nephrology*, v. 74, n. 5, p. 538–550, 2022.