v7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM HEMATOLOGIA LABORATORIAL: IMPACTO NO DIAGNÓSTICO

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LABORATORY HEMATOLOGY: IMPACT ON DIAGNOSIS

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN HEMATOLOGÍA DE LABORATORIO: IMPACTO EN EL DIAGNÓSTICO

Éverton José Ferreira de Araújo[1], Janyerson Dannys Pereira da Silva[2], Danielle Yasmin Moura Lopes de Araujo[3], José Couras da Silva Filho[4], Marcelo Rodrigues Mendes[5], Pedro Simão da Silva Azevedo[6], Maria Luíza Passos Ribeiro Maia[7], Isadora Marques Silva Sousa[7], Mariana Isabela Beserra de Menezes[7]

e798920
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.8920

PUBLICADO: 09/2026

RESUMO

A inteligência artificial (IA) apresenta crescente aplicação na hematologia laboratorial, com potencial para aprimorar o diagnóstico e a interpretação de dados complexos. Este estudo objetivou analisar suas principais aplicações, contribuições, limitações e perspectivas. Realizou-se uma revisão integrativa, de abordagem qualitativa, mediante busca no PubMed/MEDLINE com os termos artificial intelligence AND hematology presentes no título das publicações. Foram identificados 31 estudos, dos quais 21 atenderam aos critérios de elegibilidade. As evidências demonstraram aplicações de machine learning e deep learning na análise morfológica de células sanguíneas e medula óssea, citometria de fluxo, dados genômicos, modelos preditivos e sistemas point-of-care, com ganhos de precisão, padronização e eficiência diagnóstica. Também foram identificadas aplicações emergentes de modelos generativos e de linguagem no suporte às atividades clínicas, laboratoriais e educacionais. Persistem, contudo, limitações relacionadas à qualidade e representatividade dos bancos de dados, validação multicêntrica, explicabilidade, interoperabilidade e aspectos éticos e regulatórios. Conclui-se que a IA possui potencial para ampliar a precisão diagnóstica e otimizar os fluxos laboratoriais, devendo atuar como ferramenta complementar ao especialista e ser incorporada mediante validação científica e supervisão profissional.

PALAVRAS-CHAVE: Diagnóstico. Hematologia. Inteligência artificial.

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) is increasingly being applied in laboratory hematology, with the potential to improve diagnosis and the interpretation of complex data. This study aimed to analyze its main applications, contributions, limitations, and future perspectives. An integrative literature review with a qualitative approach was conducted through a search of PubMed/MEDLINE using the terms artificial intelligence AND hematology in the titles of the publications. A total of 31 studies were identified, of which 21 met the eligibility criteria. The evidence demonstrated applications of machine learning and deep learning in the morphological analysis of blood and bone marrow cells, flow cytometry, genomic data, predictive models, and point-of-care systems, resulting in improvements in diagnostic accuracy, standardization, and efficiency.

[1] Universidade Federal do Piauí. Campus Ministro Petrônio Portella. Teresina (PI). Docente de Hematologia Clínica para Farmácia. Doutor em Biotecnologia (RENORBIO).
[2] Universidade Federal do Piauí. Campus Ministro Petrônio Portella. Teresina (PI). Docente de Fisiologia. Doutor em Farmacologia (UNIFESP).
[3] Enfermeira do Estratégia Saúde da Família. Fundação Municipal de Saúde. Teresina (PI).
[4] Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares. Hospital Universitário da UFPI. Doutor em Biotecnologia (RENORBIO).
[5] Farmacêutico-bioquímico. Laboratório Mendes Labclin. Presidente Dutra (MA).
[6] Farmacêutico. Mestre em Farmacologia (UFPI). UNICET Centro Universitário.
[7] Universidade Federal do Piauí. Campus Ministro Petrônio Portella. Teresina (PI). Discente do curso de Bacharelado em Farmácia.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Emerging applications of generative and large language models in supporting clinical, laboratory, and educational activities were also identified. However, limitations remain regarding the quality and representativeness of datasets, multicenter validation, explainability, interoperability, and ethical and regulatory issues. It is concluded that AI has the potential to improve diagnostic accuracy and optimize laboratory workflows and should be used as a complementary tool to specialists and implemented with scientific validation and professional oversight.

KEYWORDS: *Artificial intelligence. Diagnosis. Hematology.*

RESUMEN
La inteligencia artificial (IA) tiene una aplicación creciente en la hematología de laboratorio, con potencial para mejorar el diagnóstico y la interpretación de datos complejos. Este estudio tuvo como objetivo analizar sus principales aplicaciones, contribuciones, limitaciones y perspectivas futuras. Se realizó una revisión integradora de la literatura, con enfoque cualitativo, mediante una búsqueda en PubMed/MEDLINE utilizando los términos artificial intelligence AND hematology presentes en los títulos de las publicaciones. Se identificaron 31 estudios, de los cuales 21 cumplieron los criterios de elegibilidad. Las evidencias demostraron aplicaciones de machine learning y deep learning en el análisis morfológico de células sanguíneas y de médula ósea, citometría de flujo, datos genómicos, modelos predictivos y sistemas point-of-care, con mejoras en la precisión, estandarización y eficiencia diagnósticas. También se identificaron aplicaciones emergentes de modelos generativos y de lenguaje de gran escala para apoyar las actividades clínicas, de laboratorio y educativas. Sin embargo, persisten limitaciones relacionadas con la calidad y representatividad de las bases de datos, la validación multicéntrica, la explicabilidad, la interoperabilidad y los aspectos éticos y regulatorios. Se concluye que la IA tiene potencial para mejorar la precisión diagnóstica y optimizar los flujos de trabajo de laboratorio, y debe utilizarse como una herramienta complementaria al especialista e implementarse con validación científica y supervisión profesional.

PALABRAS-CLAVE: *Diagnóstico. Hematología. Inteligencia artificial.*

INTRODUÇÃO

A hematologia laboratorial constitui uma das áreas mais importantes da medicina diagnóstica, desempenhando papel essencial na identificação, classificação, monitoramento e acompanhamento terapêutico de doenças hematológicas. O diagnóstico dessas enfermidades depende da integração de diferentes metodologias, incluindo o hemograma automatizado e a avaliação morfológica do sangue periférico e da medula óssea, a citometria de fluxo, a citogenética e a biologia molecular. Nesse contexto, a inteligência artificial (IA) surge como uma tecnologia capaz de auxiliar o especialista na interpretação de informações, aumentando a precisão diagnóstica, reduzindo a variabilidade interobservador e contribuindo para uma medicina laboratorial mais eficiente e personalizada (WALTER *et al.,* 2021; RÖSLER *et al.,* 2023).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Embora o conceito de IA tenha sido proposto ainda na década de 1950, sua aplicação prática em hematologia intensificou-se principalmente na última década, impulsionada pelo aumento da capacidade computacional, pela digitalização dos exames laboratoriais e pelo desenvolvimento de algoritmos de *machine learning* (ML) e *deep learning* (DL). Diferentemente dos métodos estatísticos convencionais, esses algoritmos aprendem diretamente a partir dos dados, identificando padrões complexos e correlações muitas vezes imperceptíveis pelo homem. Como consequência, passaram a ser empregados na classificação automática de células, no reconhecimento de alterações morfológicas, na estratificação prognóstica e na análise de resposta terapêutica (KAESTNER, 2020; GUNES, 2025; VERGHESE *et al.,* 2026).

Atualmente, além da interpretação automatizada de exames, tem-se o desenvolvimento de novos equipamentos hematológicos com aplicação de IA na prática laboratorial. Sistemas como o Hilab e o Sight OLO empregam algoritmos de aprendizado associados à microscopia digital para realização de hemogramas automatizados em plataformas compactas destinadas ao atendimento descentralizado (*point-of-care testing)*. Esses dispositivos apresentaram elevada concordância analítica com equipamentos laboratoriais convencionais, demonstrando potencial para ampliar o acesso e a confiabilidade do diagnóstico hematológico (GASPARIN *et al.,* 2022; PASSAMONTI *et al.,* 2022).

Mais recentemente, o desenvolvimento da inteligência artificial generativa e dos modelos de linguagem de grande escala (*Large Language Models* - LLMs) inaugurou uma nova etapa na incorporação da IA à hematologia. Embora esses sistemas ainda não sejam destinados ao diagnóstico direto, apresentam potencial para sintetizar literatura científica, apoiar a documentação clínica, estruturar relatórios laboratoriais, facilitar atividades educacionais e integrar informações provenientes de diferentes sistemas hospitalares (WYATT *et al.,* 2024; TALMAN *et al.,* 2026).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo revisar a literatura científica acerca das aplicações da inteligência artificial na hematologia laboratorial, abordando suas principais aplicações diagnósticas, impacto na rotina dos laboratórios clínicos e sua contribuição para o aumento da precisão diagnóstica, bem como suas limitações atuais e perspectivas futuras.

METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa, conduzida por meio de busca bibliográfica na base de dados PubMed/MEDLINE, com o objetivo de sintetizar as evidências disponíveis acerca das aplicações da inteligência artificial na hematologia

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

laboratorial. A estratégia de busca foi executada em 1º de julho de 2026, utilizando os descritores "*artificial intelligence"* e "*hematology",* combinados pelo operador booleano AND, com restrição para que ambos os termos estivessem presentes no título das publicações.

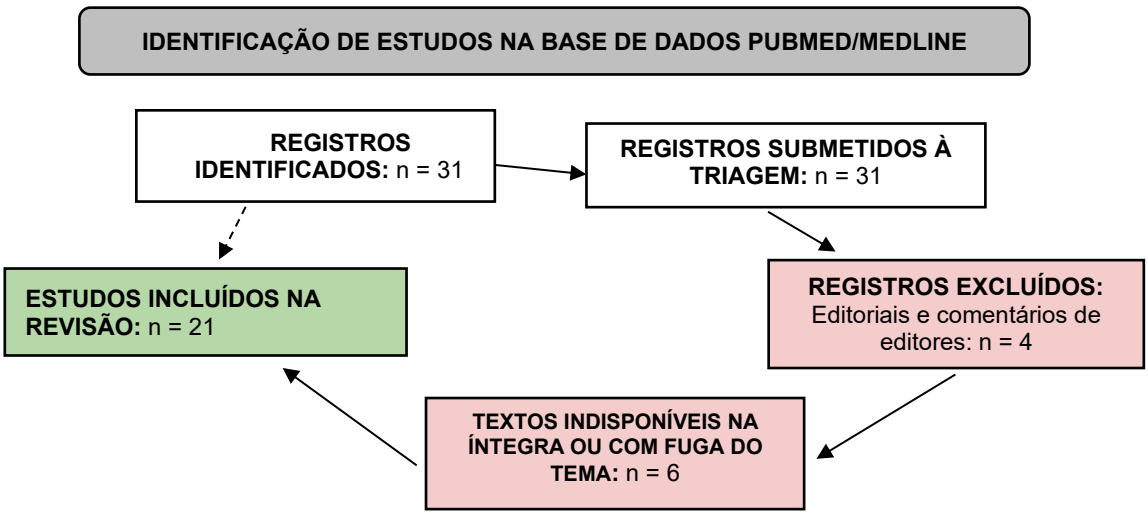
Foram aplicados filtros para seleção de artigos e revisões publicados nos últimos 10 anos, disponíveis na íntegra (*full text)* e redigidos em língua inglesa. Posteriormente, procedeu-se à triagem dos estudos com a inclusão de artigos e revisões que abordassem a aplicação da inteligência artificial na hematologia; que estivessem disponíveis em texto completo; e que fossem publicados em inglês. Foram excluídas publicações em outros idiomas, artigos com acesso restrito ao texto completo e manuscritos classificados como comentários de editores. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, os estudos selecionados foram submetidos à leitura integral.

A análise dos artigos foi realizada de forma comparativa, contemplando as principais informações referentes às aplicações da inteligência artificial na hematologia, as vantagens, as limitações e as perspectivas futuras descritas pelos autores, com foco no seu impacto no diagnóstico laboratorial de doenças hematológicas. Os artigos selecionados foram organizados e encontram-se apresentados no Quadro 1, a seguir.

RESULTADOS

Após a aplicação do método de busca, foram localizados 31 artigos científicos, dos quais 21 foram incluídos na pesquisa, conforme o fluxograma abaixo (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma da metodologia de busca e resultados quantitativos da pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O Quadro 1 apresenta os artigos selecionados e utilizados na presente revisão após sua leitura integral e análise comparada.

Quadro 1. Artigos selecionados para análise e apresentados de acordo com seus autores, ano da publicação, título e periódico

ANO (nº de artigos)	TÍTULO	AUTORIA	PERIÓDICO
2020 (2)	*Artificial intelligence in hematology: current challenges and opportunities*	RADAKOVICH; NAGY; NAZHA.	Current Hematologic Malignancy Reports
	Artificial intelligence meets hematology	KAESTNER.	Transfusion and Apheresis Science
2021 (2)	*An artificial intelligence-assisted diagnostic platform for rapid near-patient hematology*	BACHAR *et al.*	American Journal of Hematology
	How artificial intelligence might disrupt diagnostics in hematology in the near future	WALTER *et al.*	Oncogene
2022 (3)	*The future of research in hematology: Integration of conventional studies with real-world data and artificial intelligence*	PASSAMONTI *et al.*	Blood Reviews
	A Review of Artificial Intelligence Applications in Hematology Management: Current Practices and Future Prospects	EL ALAOUI *et al.*	Journal of Medical Internet Research
	Hilab system, a new point-of-care hematology analyzer supported by the Internet of Things and Artificial Intelligence	GASPARIN *et al.*	Scientific Reports
2023 (3)	*Challenging gold standard hematology diagnostics through the introduction of whole genome sequencing and artificial intelligence*	HAFERLACH; WALTER.	International Journal of Laboratory Hematology
	Synthetic Data Generation by Artificial Intelligence to Accelerate Research and Precision Medicine in Hematology	D'AMICO *et al.*	Clinical Cancer Informatics
	An overview and a roadmap for artificial intelligence in hematology and oncology	RÖSLER *et al.*	Journal of Cancer Research and Clinical Oncology

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2024 (1)	*Making sense of artificial intelligence and large language models - including ChatGPT - in pediatric hematology/oncology*	WYATT *et al.*	Pediatric Blood and Cancer
2025 (5)	*Can medical students use artificial intelligence to learn transfusion? Evaluating ChatGPT responses to the American Society of Hematology medical student transfusion learning objectives*	MCBRIDE *et al.*	Vox Sanguinis
	Application of artificial intelligence in laboratory hematology: Advances, challenges, and prospects	LIAO *et al.*	Acta Pharmaceutica Sinica B
	Artificial intelligence in hematology	NAZHA *et al.*	Blood
	Artificial intelligence in hematology: current trends and application areas	GUNES.	Annals of Hematology
	Machine Learning and Artificial Intelligence-Based Clinical Decision Support for Modern Hematology	ZHANG *et al.*	Clinics in Laboratory Medicine
2026 (5)	*Ambient Artificial Intelligence Scribes in Pediatric Hematology - Oncology: Early Implementation of DAX Copilot*	TALMAN *et al.*	Applied Clinical Informatics
	Artificial intelligence-based chest X-ray (AI-CXR) and hematology parameters to predict mortality and intubation events in COVID-19 patients at the second-referral hospital in Indonesia	ROMADHON *et al.*	BMC Infectious Diseases
	Detecting Pseudothrombocytopenia in the Era of Artificial Intelligence: Integration of Automated Hematology, Digital Morphology, and Expert Review	LIM *et al.*	Cureus
	Artificial Intelligence Among US Hematology Oncology Fellows: A Multicenter Survey of Education, Attitudes, and Clinical Use	GARRAD *et al.*	JCO Oncology Practice
	Artificial Intelligence in Hematology.	VERGHESE *et al.*	Indian Journal of Hematology and Blood Transfusion

Fonte: Elaboração própria (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

APLICAÇÕES DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO DIAGNÓSTICO HEMATOLÓGICO

A IA pode ser definida como um conjunto de tecnologias computacionais capazes de executar tarefas que tradicionalmente exigiriam inteligência humana, como reconhecimento de padrões, aprendizado, tomada de decisão e resolução de problemas. Na medicina, seu principal objetivo não consiste em substituir o profissional de saúde, mas ampliar sua capacidade analítica por meio do processamento simultâneo de grandes volumes de informações clínicas, laboratoriais e moleculares. Na hematologia laboratorial, esse potencial torna-se particularmente relevante em razão da elevada quantidade de dados produzidos diariamente por hemogramas automatizados, imagens microscópicas, citometria de fluxo, citogenética e sequenciamento genético, cuja interpretação integrada frequentemente excede a capacidade de análise exclusivamente humana (WYATT *et al.,* 2024; WALTER *et al.,* 2021).

A pesquisa de Gunes (2025), envolvendo 376 artigos originais publicados entre 1980 e 2025, demonstrou um crescimento expressivo das pesquisas sobre inteligência artificial em hematologia, particularmente a partir de 2020, evidenciando a consolidação dessa tecnologia como ferramenta de apoio ao diagnóstico e à tomada de decisão clínica. Os principais focos de investigação identificados incluíram análise morfológica automatizada, leucemias, trombose, tromboembolismo venoso, transplante de células-tronco hematopoéticas, medicina transfusional, citometria de fluxo e modelos preditivos baseados em dados clínicos e genômicos. A análise de tendências revelou uma evolução das aplicações da IA, inicialmente centradas em métodos estatísticos e predição de risco, para abordagens baseadas em *machine learning, deep learning,* processamento de linguagem natural e análise de imagens, com o crescente emprego dessas tecnologias na classificação de doenças hematológicas, estratificação prognóstica e suporte à decisão clínica.

O hemograma permanece como o exame laboratorial mais solicitado na prática clínica e constitui a principal porta de entrada para a investigação das doenças hematológicas. Embora os analisadores hematológicos modernos apresentem elevado grau de automação, a identificação de alterações morfológicas relevantes ainda depende, em muitos casos, da revisão manual do esfregaço sanguíneo por profissionais especializados. Esse processo, além de demandar tempo, apresenta variabilidade interobservador decorrente da experiência individual do examinador, da qualidade da preparação das lâminas e da subjetividade inerente à interpretação morfológica. Nesse contexto, a IA passou a desempenhar papel fundamental na automação da análise microscópica, aumentando a reprodutibilidade dos resultados e reduzindo o tempo necessário para liberação dos exames (WALTER *et al.,* 2021; VERGHESE *et al.,* 2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As primeiras aplicações da IA na hematologia concentraram-se na avaliação automática de imagens digitais de sangue periférico. Inicialmente, os algoritmos realizavam detecção celular, extração manual de características morfológicas e posterior classificação por métodos estatísticos tradicionais, como *Support Vector Machines, Random Forests* e Redes Neurais Artificiais. Entretanto, a incorporação das Redes Neurais Convolucionais (*Convolutional Neural Networks* - CNN) modificou profundamente esse fluxo de trabalho ao permitir que o próprio algoritmo aprendesse automaticamente quais características celulares apresentavam maior relevância diagnóstica, dispensando a definição manual dos atributos morfológicos. Essa evolução proporcionou expressivo aumento da sensibilidade e da especificidade na identificação de diferentes populações celulares (EL ALAOUI *et al.,* 2022; KAESTNER, 2020; WALTER *et al.,* 2021).

Pesquisas recentes demonstram que modelos baseados em DL conseguem reconhecer automaticamente leucócitos, eritrócitos, plaquetas e suas respectivas alterações morfológicas com desempenho comparável ao de hematologistas experientes. Além da diferenciação entre granulócitos, linfócitos, monócitos, eosinófilos e basófilos, esses algoritmos passaram também a identificar blastos, plasmócitos, eritroblastos, linfócitos atípicos e outras populações celulares raras, cuja detecção manual frequentemente representa uma das etapas mais críticas da rotina laboratorial. A capacidade de reconhecer simultaneamente diferentes estágios de maturação celular ampliou significativamente o potencial diagnóstico da IA para triagem, principalmente, de leucemias agudas, de síndromes mielodisplásicas e de doenças mieloproliferativas (ZHANG *et al.,* 2025; VERGHESE *et al.,* 2026).

Entre as principais vantagens observadas nesses sistemas de IA destaca-se sua elevada capacidade de processamento. Enquanto a revisão microscópica convencional depende da análise sequencial realizada pelo observador, algoritmos computacionais podem avaliar milhares de células em poucos segundos, reduzindo significativamente o tempo de processamento das amostras. Além disso, diferentemente da análise humana, os modelos computacionais mantêm desempenho constante independentemente da carga de trabalho, da fadiga do examinador ou da experiência profissional, contribuindo para maior padronização entre laboratórios e redução da variabilidade diagnóstica (RÖSLER *et al.,* 2023; LIAO *et al.,* 2025; ZHANG *et al.,* 2025).

Outro avanço importante refere-se à identificação automática de alterações morfológicas discretas, frequentemente difíceis de serem reconhecidas durante a rotina laboratorial. Modelos recentes passaram a detectar anisocitose, poiquilocitose, hipocromia, esquizócitos, dacriócitos, esferócitos, eliptócitos e outras alterações eritrocitárias com elevada precisão, auxiliando o diagnóstico diferencial de anemias, microangiopatias trombóticas, hemoglobinopatias e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

membranopatias eritrocitárias. Da mesma forma, alterações nucleares dos leucócitos, presença de granulações tóxicas, corpos de Döhle, vacuolização citoplasmática e displasias celulares passaram a ser identificadas automaticamente por sistemas computacionais com DL, reduzindo a possibilidade de omissões durante a análise (EL ALAOUI *et al.,* 2022; VERGHESE *et al.,* 2026).

A aplicação da IA também vem transformando a análise da medula óssea. Diferentemente do sangue periférico, aspirados medulares apresentam elevada densidade celular, frequente sobreposição entre células e maior heterogeneidade morfológica, tornando sua interpretação significativamente mais complexa. Contudo, sistemas computacionais modernos conseguem identificar automaticamente regiões adequadas da lâmina e células individualizadas, classificando-as conforme sua linhagem e estágio maturacional, reduzindo o tempo necessário para avaliação microscópica e aumentando a padronização diagnóstica. Apesar dos avanços observados, essa aplicação ainda apresenta desempenho inferior ao obtido na análise do sangue periférico, principalmente em decorrência da elevada complexidade das amostras medulares (RADAKOVICH; NAGY; NAZHA, 2020; ZHANG *et al.,* 2025).

Walter *et al.* (2021) evidenciam algoritmos capazes de classificar simultaneamente até 21 tipos celulares, identificar células leucêmicas raras e reduzir significativamente a variabilidade interobservador. Complementando esses achados, El Alaoui *et al.* (2022) demonstram que diferentes modelos alcançaram acurácias superiores a 95%, incluindo aproximadamente 99% na classificação de leucócitos, mais de 98% na detecção de leucemia linfoide aguda (LLA), cerca de 98% na classificação das fases da leucemia mieloide crônica (LMC) e aproximadamente 97% no diagnóstico automatizado de linfomas, evidenciando desempenho equivalente ou superior ao de especialistas em tarefas específicas de reconhecimento morfológico celular.

Ademais, o desenvolvimento de plataformas portáteis baseadas em IA ampliou significativamente as possibilidades de realização do hemograma em ambientes descentralizados. Equipamentos como Hilab e Sight OLO associam microscopia digital, visão computacional e algoritmos de ML para executar contagens hematológicas automatizadas próximas ao paciente (*point-of-care testing*) (KAESTNER, 2020; GASPARIN *et al.,* 2022; PASSAMONTI *et al.,* 2022).

Bachar *et al.* (2021) validaram clinicamente o analisador Sight OLO em 679 amostras, comparando-o diretamente ao Sysmex XN-1000, analisador hematológico amplamente utilizado como referência. Os coeficientes de correlação obtidos foram elevados, atingindo 0,997 para leucócitos totais, 0,990 para hemoglobina, 0,982 para hematócrito, 0,991 para eritrócitos, 0,985 para plaquetas e maiores ou iguais a 0,98 para neutrófilos e eosinófilos, demonstrando desempenho equivalente. Além disso, o equipamento apresentou sensibilidade de 93%,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

especificidade de 80,6% e concordância global de 86,5% para detecção automática de eritroblastos, blastos, granulócitos imaturos e linfócitos atípicos. Os autores também demonstraram excelente concordância entre amostras venosas e obtidas por punção digital, estabelecendo o primeiro analisador aprovado pelo FDA - *Food and Drug Administration* para realização de hemograma diferencial completo utilizando sangue capilar. Esses resultados corroboram a perspectiva apresentada por Kaestner (2020), segundo a qual os dispositivos *point-of-care* associados à IA desempenharão papel estratégico na descentralização do diagnóstico e no monitoramento contínuo dos pacientes.

A citometria de fluxo, por sua vez, representa uma das principais ferramentas diagnósticas da hematologia moderna, sendo amplamente empregada na identificação, classificação e monitoramento de neoplasias hematológicas, imunodeficiências e outras doenças do sistema hematopoético. A capacidade de analisar simultaneamente dezenas de parâmetros celulares em milhões de eventos individuais tornou essa tecnologia indispensável para a prática clínica. Entretanto, o aumento progressivo do número de fluorocromos, marcadores imunofenotípicos e populações celulares avaliadas elevou significativamente a complexidade da interpretação dos resultados, tornando a análise manual cada vez mais trabalhosa e suscetível à variabilidade entre observadores. Nesse contexto, a IA passou a desempenhar papel estratégico na análise e na padronização da interpretação dos dados (RÖSLER *et al.,* 2023; LIAO *et al.,* 2025).

Historicamente, a interpretação da citometria de fluxo baseou-se na construção manual de regiões de análise (*gating)*, processo no qual o especialista seleciona sucessivamente populações celulares utilizando gráficos bidimensionais. Embora consolidado na prática laboratorial, esse método apresenta limitações importantes, sobretudo em exames multiparamétricos, nos quais dezenas de combinações entre marcadores precisam ser avaliadas. Além de consumir tempo considerável, o *gating* manual depende da experiência do examinador e pode produzir resultados distintos quando realizado por profissionais diferentes. Como consequência, algoritmos de ML passaram a ser desenvolvidos para automatizar esse processo, reduzindo a subjetividade da análise e aumentando sua reprodutibilidade (WALTER *et al.,* 2021; VERGHESE *et al.,* 2026).

Uma das primeiras aplicações da IA na citometria de fluxo consistiu na utilização de algoritmos de agrupamento (*clustering)* capazes de identificar automaticamente populações celulares sem necessidade de classificação prévia. Métodos como *FlowSOM, PhenoGraph, SPADE e t-SNE* permitiram revelar padrões imunofenotípicos complexos, muitas vezes não identificados durante a análise convencional. Esses recursos ampliaram a capacidade de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

caracterização das populações celulares e facilitaram a descoberta de fenótipos anteriormente pouco reconhecidos, contribuindo para o refinamento diagnóstico das neoplasias hematológicas (RÖSLER *et al.,* 2023; LIAO *et al.,* 2025).

Além da automatização do *gating,* algoritmos passaram a ser empregados para classificar diferentes tipos de leucemias e linfomas com base em assinaturas imunofenotípicas. A partir de grandes bancos de dados previamente rotulados, esses modelos aprendem a reconhecer combinações específicas de expressão antigênica associadas a diferentes entidades nosológicas. Em diversas investigações, a IA demonstrou elevada concordância com especialistas na diferenciação entre leucemia mieloide aguda (LMA), leucemia linfoide aguda (LLA), leucemia mieloide crônica (LMC), leucemia linfoide crônica (LLC) e diversas neoplasias linfoproliferativas, reduzindo o tempo de interpretação dos exames e aumentando a padronização entre laboratórios (WALTER *et al.,* 2021; ZHANG *et al.,* 2025; WYATT *et al.,* 2024).

Outra aplicação de grande relevância refere-se à detecção da doença residual mínima (DRM), considerada um dos principais fatores prognósticos em diversas neoplasias hematológicas. A identificação de pequenas populações celulares neoplásicas residuais, frequentemente inferiores a 0,01% dos eventos analisados, exige elevada sensibilidade analítica e interpretação extremamente criteriosa dos dados citométricos. Algoritmos de ML têm demonstrado capacidade para reconhecer padrões imunofenotípicos residuais com elevada precisão, reduzindo a influência da subjetividade humana e aumentando a sensibilidade da detecção, especialmente em casos de LMA e LLA. A automatização dessa etapa tende a favorecer maior padronização entre centros e melhorar a reprodutibilidade dos resultados utilizados para decisões terapêuticas (ZHANG *et al.,* 2025; LIAO *et al.,* 2025).

Outro avanço foi a incorporação do sequenciamento de nova geração (*Next-Generation Sequencing* - NGS), o qual transformou profundamente o diagnóstico das neoplasias hematológicas ao permitir a identificação simultânea de centenas de alterações genéticas associadas ao desenvolvimento, prognóstico e resposta terapêutica dessas doenças. Entretanto, o elevado volume de variantes produzidas por essas plataformas tornou a interpretação molecular um dos maiores desafios da hematologia contemporânea. Nesse cenário, algoritmos de inteligência artificial passaram a ser empregados para identificar variantes patogênicas, reconhecer assinaturas moleculares complexas e integrar informações genômicas com dados clínicos, laboratoriais e morfológicos, favorecendo diagnósticos mais precisos e individualizados (HAFERLACH; WALTER, 2023; WALTER *et al.,* 2021).

A integração entre dados genômicos e algoritmos de aprendizado de máquina permitiu a construção de modelos capazes de reconhecer combinações de mutações associadas a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

diferentes entidades hematológicas, contribuindo para a atualização das classificações diagnósticas baseadas em alterações moleculares. Além da identificação de variantes individuais, esses sistemas conseguem analisar simultaneamente vias biológicas, perfis transcriptômicos e alterações epigenéticas, produzindo modelos mais robustos para classificação diagnóstica e estratificação prognóstica. Essa abordagem representa um dos principais pilares da medicina de precisão em hematologia (HAFERLACH; WALTER, 2023; LIAO *et al.,* 2025).

Além do diagnóstico, a IA vem sendo empregada ainda para prever desfechos clínicos relevantes, como resposta terapêutica, recaída, sobrevida global e complicações relacionadas ao tratamento. Utilizando grandes bases de dados clínicos e laboratoriais, modelos preditivos conseguem identificar fatores de risco muitas vezes imperceptíveis por métodos estatísticos tradicionais, contribuindo para decisões terapêuticas mais individualizadas (PASSAMONTI *et al.,* 2022; ZHANG *et al.,* 2025; NAZHA *et al.,* 2025).

Esses modelos apresentam aplicações relevantes na previsão de mortalidade hospitalar, risco de infecção, trombose, sangramento, falha terapêutica e indicação de transplante de células-tronco hematopoéticas. A utilização integrada de informações clínicas, laboratoriais e moleculares permite estratificações de risco mais refinadas do que aquelas obtidas por escores convencionais, favorecendo uma assistência baseada em evidências e centrada nas características individuais de cada paciente (PASSAMONTI *et al.,* 2022; HAFERLACH; WALTER, 2023; VERGHESE *et al.,* 2026).

Verifica-se, portanto, que a incorporação da IA modificará substancialmente o fluxo de trabalho dos laboratórios clínicos. Atividades repetitivas, como triagem de esfregaços, classificação celular, interpretação inicial da citometria de fluxo e organização de dados laboratoriais, passarão a ser executadas automaticamente, permitindo que os profissionais concentrem seus esforços em casos complexos e na correlação clínico-laboratorial. Como consequência, ter-se-á aumento da produtividade, redução do tempo de resposta dos exames e maior padronização diagnóstica (LIAO *et al.,* 2025; RÖSLER *et al.,* 2023; WALTER *et al.,* 2021).

Uma aplicação particularmente relevante da IA refere-se ao reconhecimento da pseudotrombocitopenia, condição laboratorial decorrente da agregação plaquetária *in vitro* que pode resultar em trombocitopenia espúria e conduzir a investigações, tratamentos e procedimentos desnecessários. Nesse contexto, Lim *et al.* (2026) propõem um fluxo diagnóstico integrado no qual algoritmos de IA combinam informações provenientes dos analisadores hematológicos, histogramas plaquetários, canais ópticos e fluorescentes, sistemas de morfologia digital, dados pré-analíticos e revisão especializada para identificar padrões sugestivos de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

agregação plaquetária e priorizar amostras para análise confirmatória. Os autores destacam que a IA não deve ser empregada como sistema diagnóstico autônomo, mas como ferramenta de suporte à decisão laboratorial, capaz de aumentar a eficiência do fluxo analítico, reduzir a liberação de resultados falso-negativos e minimizar erros associados à pseudotrombocitopenia, preservando a revisão microscópica e o julgamento clínico do hematologista como etapas indispensáveis do processo diagnóstico (LIM *et al.,* 2026).

Destaca-se, ainda, a pesquisa de D'Amico *et al.* (2023), a qual apresenta uma das aplicações mais inovadoras da IA na hematologia ao demonstrar que dados sintéticos (*synthetic data)*, gerados por modelos de IA, podem reproduzir com elevada fidelidade as características clínicas, genômicas e prognósticas de 7.133 pacientes reais com neoplasias mieloides (Síndrome Mielodisplásica e LMA). Para gerar os pacientes sintéticos foi empregada uma arquitetura de inteligência artificial baseada em *Conditional Generative Adversarial Networks* (cGANs), um tipo avançado de rede neural composta por dois modelos que competem entre si: um responsável por criar pacientes artificiais, e outro encarregado de distinguir pacientes reais dos sintéticos. O treinamento contínuo entre essas duas redes faz com que os dados artificiais se tornem progressivamente mais semelhantes aos reais com anonimização efetiva. Esse achado indica uma das formas promissoras de aplicação da IA na área da saúde.

DESAFIOS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos excelentes resultados apresentados, a análise morfológica baseada em IA ainda enfrenta limitações importantes. O desempenho dos algoritmos permanece altamente dependente da qualidade das imagens utilizadas durante o treinamento, da padronização dos métodos de coloração, da calibração dos sistemas ópticos e da representatividade dos bancos de dados empregados. Além disso, células raras, artefatos técnicos, preparações inadequadas e doenças pouco prevalentes continuam representando importantes desafios para os modelos atuais. Dessa forma, a literatura é unânime em reconhecer que a IA deve atuar como ferramenta de apoio ao especialista, aumentando sua eficiência e reduzindo erros diagnósticos, sem substituir a avaliação crítica realizada pelo hematologista ou patologista clínico (WYATT *et al.,* 2024; WALTER *et al.,* 2021).

Além do exposto, tem-se que muitos algoritmos permanecem dependentes de bases de dados restritas e pouco representativas, o que pode comprometer sua capacidade de generalização quando aplicados a diferentes populações. Além disso, as diferenças entre equipamentos, protocolos laboratoriais e características demográficas podem introduzir vieses

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

capazes de reduzir o desempenho dos modelos computacionais (ZHANG *et al.,* 2025; VERGHESE *et al.,* 2026).

Por sua vez, a implementação rotineira dessas tecnologias de IA associada à citometria de fluxo também enfrenta desafios relevantes. A ausência de protocolos universalmente padronizados para aquisição de dados, diferenças entre citômetros, painéis de anticorpos distintos e variações nos procedimentos laboratoriais podem comprometer os modelos. Muitos algoritmos apresentam comportamento de "caixa-preta" (*black box*), dificultando a compreensão dos critérios utilizados para classificação celular e limitando sua aceitação clínica e científica. Dessa forma, diversos autores defendem o desenvolvimento de modelos de IA explicável (*Explainable Artificial Intelligence* - XAI), capazes de tornar transparentes os fatores responsáveis pelas decisões algorítmicas e aumentar a confiança dos profissionais de saúde na utilização dessas ferramentas (WYATT *et al.,* 2024; VERGHESE *et al.,* 2026).

Ademais, aspectos relacionados à privacidade dos dados, segurança da informação, consentimento dos pacientes e regulamentação também ocupam posição central nas discussões atuais. A utilização de grandes bancos de dados clínicos exige mecanismos robustos de anonimização, governança e proteção das informações, garantindo conformidade com normas éticas e legislações vigentes. Dessa forma, a literatura converge ao afirmar que a adoção responsável da IA dependerá tanto do desenvolvimento tecnológico quanto do estabelecimento de políticas regulatórias adequadas (NAZHA *et al.,* 2025; PASSAMONTI *et al.,* 2022; WYATT *et al.,* 2024).

Os estudos também mostram que a incorporação da IA depende da adequada capacitação dos profissionais e do reconhecimento de suas limitações. Garrad *et al.* (2026) verificaram que 74% dos médicos residentes em Hematologia/Oncologia utilizavam ferramentas de IA, principalmente para esclarecer conceitos (86%), resumir literatura científica (83%) e explorar novas pesquisas (75%). Paralelamente, McBride *et al.* (2025) demonstraram que o ChatGPT apresentou desempenho apenas moderado no ensino de medicina transfusional, sendo que aproximadamente um terço das respostas foi considerado insatisfatório ou potencialmente inseguro para a prática clínica. Em conjunto, esses resultados indicam que, embora a IA represente um importante instrumento de apoio ao diagnóstico hematológico, sua utilização deve permanecer sob supervisão profissional e ser acompanhada de validação científica, treinamento estruturado e avaliação crítica de seus resultados.

As tendências atuais indicam que a hematologia laboratorial evoluirá para modelos diagnósticos cada vez mais integrados, nos quais informações provenientes da morfologia digital, citometria de fluxo, genômica, proteômica e registros eletrônicos de saúde serão analisadas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

simultaneamente por sistemas inteligentes. Essa integração multimodal permitirá diagnósticos mais precoces, maior precisão prognóstica e individualização das estratégias terapêuticas, consolidando a medicina de precisão como paradigma da hematologia contemporânea (HAFERLACH; WALTER, 2023; LIAO *et al.,* 2025).

Espera-se que a evolução dos modelos computacionais, associada à melhoria da explicabilidade dos algoritmos e ao aumento da interoperabilidade entre plataformas laboratoriais, amplie ainda mais a utilização da IA em atividades assistenciais, administrativas e educacionais. Entretanto, a literatura é consistente ao afirmar que essas tecnologias deverão atuar como instrumentos de apoio à decisão clínica, preservando o profissional da área de Hematologia como responsável final pela interpretação dos resultados e pela condução terapêutica dos pacientes (WYATT *et al.,* 2024; TALMAN *et al.,* 2026).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inteligência artificial vem promovendo uma transformação profunda na hematologia laboratorial ao ampliar a capacidade de processamento, integração e interpretação de dados clínicos, morfológicos, imunofenotípicos e moleculares. As evidências analisadas nesta revisão demonstram que algoritmos de aprendizado de máquina, aprendizado profundo e modelos generativos apresentam desempenho crescente em aplicações que envolvem análise morfológica automatizada, citometria de fluxo, genômica, medicina de precisão e apoio à decisão clínica, contribuindo para maior precisão diagnóstica, redução da variabilidade interobservador e otimização dos fluxos laboratoriais.

Entretanto, os estudos também evidenciam que a incorporação segura dessas tecnologias depende da superação de desafios relacionados à qualidade dos bancos de dados, validação multicêntrica, explicabilidade dos algoritmos, interoperabilidade entre plataformas e aspectos éticos referentes ao uso de informações em saúde. Dessa forma, a inteligência artificial deve ser compreendida como uma ferramenta complementar ao conhecimento do hematologista, potencializando sua capacidade analítica sem substituir o julgamento clínico especializado.

Por fim, a convergência entre inteligência artificial, automação laboratorial, genômica e medicina personalizada sinaliza uma mudança estrutural na prática hematológica. À medida que modelos mais robustos, transparentes e validados forem incorporados aos laboratórios clínicos, espera-se que essas tecnologias contribuam para diagnósticos mais precoces, terapias mais individualizadas e melhores desfechos clínicos, consolidando a inteligência artificial como uma importante ferramenta para a hematologia laboratorial nas próximas décadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REFERÊNCIAS

BACHAR, N. *et al.* An artificial intelligence-assisted diagnostic platform for rapid near-patient hematology. **American Journal of Hematology**, v. 96, n. 10, p. 1264-1274, out. 2021. DOI: 10.1002/ajh.26295.

D'AMICO, S. *et al.* Synthetic data generation by artificial intelligence to accelerate research and precision medicine in hematology. **JCO Clinical Cancer Informatics**, Alexandria, VA, v. 7, e2300021, jun. 2023. DOI: 10.1200/CCI.23.00021.

EL ALAOUI, Y. *et al.* A review of artificial intelligence applications in hematology management: current practices and future prospects. **Journal of Medical Internet Research**, Toronto, v. 24, n. 7, e36490, jul. 2022. DOI: 10.2196/36490.

GARRAD, E. *et al.* Artificial intelligence among US hematology oncology fellows: a multicenter survey of education, attitudes, and clinical use. **JCO Oncology Practice**, Alexandria, VA, maio 2026. DOI: 10.1200/OP-26-00433.

GASPARIN, A. T. *et al.* Hilab system, a new point-of-care hematology analyzer supported by the internet of things and artificial intelligence. **Scientific Reports**, London, v. 12, art. 10409, jun. 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-13913-8.

GUNES, E. K. Artificial intelligence in hematology: current trends and application areas. **Annals of Hematology,** Berlin, v. 104, n. 11, p. 6033-6043, nov. 2025. DOI: 10.1007/s00277-025-06706-2.

HAFERLACH, T.; WALTER, W. Challenging gold standard hematology diagnostics through the introduction of whole genome sequencing and artificial intelligence. **International Journal of Laboratory Hematology**, Oxford, v. 45, n. 2, p. 156-162, abr. 2023. DOI: 10.1111/ijlh.14033.

KAESTNER, L. Artificial intelligence meets hematology. **Transfusion and Apheresis Science**, Oxford, v. 59, n. 6, art. 102986, dez. 2020. DOI**:** 10.1016/j.transci.2020.102986.

LIAO, H. *et al.* Application of artificial intelligence in laboratory hematology: advances, challenges, and prospects. **Acta Pharmaceutica Sinica B,** Amsterdam, v. 15, n. 11, p. 5702-5733, nov. 2025. DOI: 10.1016/j.apsb.2025.05.036.

LIM, E. C. N.; CHENG, N. C. L.; LIM, C. E. D. Detecting pseudothrombocytopenia in the era of artificial intelligence: integration of automated hematology, digital morphology, and expert review. **Cureus**, Palo Alto, CA, v. 18, n. 6, e110690, jun. 2026. DOI: 10.7759/cureus.110690.

MCBRIDE, E.; LEUNG, E.; FORD, J. Can medical students use artificial intelligence to learn transfusion? Evaluating ChatGPT responses to the American Society of Hematology medical student transfusion learning objectives. **Vox Sanguinis,** Oxford, publicação antecipada on-line, jul. 2025. DOI: 10.1111/vox.70070.

NAZHA, A. *et al.* Artificial intelligence in hematology. **Blood**, New York, v. 146, n. 19, p. 2283-2292, nov. 2025. DOI: 10.1182/blood.2025029876.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

PASSAMONTI, F. *et al.* The future of research in hematology: integration of conventional studies with real-world data and artificial intelligence. **Blood Reviews**, London, v. 54, art. 100914, jul. 2022. DOI: 10.1016/j.blre.2021.100914.

RADAKOVICH, N.; NAGY, M.; NAZHA, A. Artificial intelligence in hematology: current challenges and opportunities. **Current Hematologic Malignancy Reports**, New York, v. 15, n. 3, p. 203-210, jun. 2020. DOI: 10.1007/s11899-020-00575-4.

ROMADHON, P. Z. *et al.* Artificial intelligence-based chest X-ray (AI-CXR) and hematology parameters to predict mortality and intubation events in COVID-19 patients at the second-referral hospital in Indonesia. **BMC Infectious Diseases,** London, v. 26, art. 798, mar. 2026. DOI: 10.1186/s12879-026-13052-9.

RÖSLER, W. *et al.* An overview and a roadmap for artificial intelligence in hematology and oncology. **Journal of Cancer Research and Clinical Oncology,** Berlin, publicação antecipada on-line, 15 mar. 2023. DOI: 10.1007/s00432-023-04667-5.

TALMAN, M. *et al.* Ambient artificial intelligence scribes in pediatric hematology-oncology: early implementation of DAX Copilot. **Applied Clinical Informatics**, Stuttgart, v. 17, n. 2, p. 374-379, mar. 2026. DOI: 10.1055/a-2873-3894.

VERGHESE, R.; IQUBAL, A.; MISHRA, K. Artificial intelligence in hematology. **Indian Journal of Hematology and Blood Transfusion,** Mumbai, v. 42, p. 1135-1153, jul. 2026. DOI: 10.1007/s12288-025-02244-z.

WALTER, W. *et al.* How artificial intelligence might disrupt diagnostics in hematology in the near future. **Oncogene**, Basingstoke, v. 40, n. 25, p. 4271-4280, jun. 2021. DOI: 10.1038/s41388-021-01861-y.

WYATT, K. D. *et al.* Making sense of artificial intelligence and large language models - including ChatGPT - in pediatric hematology/oncology. **Pediatric Blood & Cancer**, Hoboken, v. 71, n. 9, e31143, set. 2024. DOI**:** 10.1002/pbc.31143.

ZHANG, C. *et al.* Machine learning and artificial intelligence-based clinical decision support for modern hematology. **Clinics in Laboratory Medicine**, Philadelphia, v. 45, n. 4, p. 691-705, dez. 2025. DOI: 10.1016/j.cll.2025.07.011.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.