

REVISÃO DE LITERATURA IDENTIFICADO

PREDIÇÃO DE CRISES VASO-OCCLUSIVAS NA DOENÇA FALCIFORME POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E DISPOSITIVOS VESTÍVEIS: REVISÃO DE ESCOPO

PREDICTION OF VASO-OCCLUSIVE CRISES IN SICKLE CELL DISEASE USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND WEARABLE DEVICES: A SCOPING REVIEW

Vitor Comassetto Paes¹; Gabriel Henrique Carvalho Leite Romeiro¹; Lavínia Vital Quixadá Souza¹; Jessyca Lane Fausto Lira¹; Luciano Timbo Barbosa¹; Reinaldo dos Santos Moura²

1 Acadêmico(a) de Medicina, Centro Universitário de Maceió (UNIMA/Afya), Maceió/AL

2 Docente de Medicina, Centro Universitário de Maceió (UNIMA/Afya), Maceió/AL

E-mail do autor principal: reinaldo.santos@afya.com.br

Eixo Temático: Eixo 03 - Tecnologia e Inovação

RESUMO

A doença falciforme é a doença hematológica hereditária mais comum no mundo, e a crise vaso-oclusiva, seu principal evento agudo, é imprevisível, dolorosa e a maior causa de hospitalização nessa população. Dispositivos vestíveis (wearables) associados a inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina surgem como estratégia para prever crises antes do seu início clínico, mas a extensão dessa literatura ainda não foi mapeada. Objetivou-se mapear a extensão, a natureza e as lacunas da literatura sobre predição de crises vaso-oclusivas por IA a partir de dados de dispositivos vestíveis. Trata-se de revisão de escopo conduzida segundo a metodologia do Joanna Briggs Institute (JBI) e reportada conforme o checklist PRISMA-ScR, com buscas em PubMed/MEDLINE, LILACS/BVS, SciELO e IEEE Xplore, sem restrição geográfica, resultando em 410 registros identificados, 379 após remoção de duplicatas, 11 estudos elegíveis após triagem por título e resumo e 5 estudos primários incluídos após leitura integral. Os 5 estudos incluídos, publicados entre 2017 e 2023, todos americanos, empregaram sinais fisiológicos de wearables comerciais ou dedicados (fotopletismografia, frequência cardíaca, atividade) associados a modelos estatísticos ou de aprendizado de máquina para prever dor ou crise iminente, com resultados preliminares promissores, mas nenhum ensaio clínico randomizado nem validação externa multicêntrica. Conclui-se que a predição de crises vaso-oclusivas por IA e wearables é um campo emergente, numericamente pequeno e concentrado em estudos-piloto de viabilidade, com lacuna evidente de estudos confirmatórios de maior porte, sobretudo fora dos Estados Unidos.

Palavras-chave: Anemia Falciforme. Inteligência Artificial. Dispositivos Eletrônicos Vestíveis. Aprendizado de Máquina. Telemetria.

ABSTRACT

Sickle cell disease is the most common inherited hematological disease worldwide, and vaso-occlusive crisis, its main acute event, is unpredictable, painful, and the leading cause of hospitalization in this population. Wearable devices combined with artificial intelligence (AI) and machine learning have emerged as a strategy to predict crises

before clinical onset, but the extent of this literature has not yet been mapped. The objective was to map the extent, nature, and gaps in the literature on AI-based prediction of vaso-occlusive crises using wearable device data. This is a scoping review conducted according to the Joanna Briggs Institute (JBI) methodology and reported according to the PRISMA-ScR checklist, with searches in PubMed/MEDLINE, LILACS/BVS, SciELO, and IEEE Xplore, without geographic restriction, resulting in 410 records identified, 379 after duplicate removal, 11 eligible studies after title and abstract screening, and 5 primary studies included after full-text reading. The 5 included studies, published between 2017 and 2023, all from the United States, used physiological signals from commercial or dedicated wearables (photoplethysmography, heart rate, activity) combined with statistical or machine learning models to predict pain or impending crisis, with promising preliminary results but no randomized controlled trial or multicenter external validation. It is concluded that AI- and wearable-based prediction of vaso-occlusive crises is an emerging field, numerically small and concentrated in feasibility pilot studies, with a clear gap for larger confirmatory studies, especially outside the United States.

Keywords: Anemia, Sickle Cell. Artificial Intelligence. Wearable Electronic Devices. Machine Learning. Telemetry.

INTRODUÇÃO

A doença falciforme é a doença hematológica hereditária mais comum no mundo, resultante de mutação no gene da beta-globina, com maior prevalência na África Subsaariana, Índia e nas Américas, incluindo o Brasil¹. Seu curso clínico é marcado por complicações crônicas multissistêmicas e por eventos agudos recorrentes, dos quais a crise vaso-oclusiva é o mais frequente: episódio de dor intensa e imprevisível, decorrente da obstrução microvascular por hemácias falcizadas, e a principal causa de hospitalização e de procura por serviço de emergência nessa população².

A imprevisibilidade da crise vaso-oclusiva é, em si, um problema clínico: sem sinal de alerta confiável, a intervenção é predominantemente reativa, iniciada após o início da dor. Uma comissão internacional recente definiu estratégias globais para reduzir a carga da doença falciforme³, contexto em que a antecipação de complicações agudas por monitoramento contínuo se apresenta como via ainda pouco explorada, sobretudo em populações com menor acesso a cuidado especializado.

A aplicação de IA e aprendizado de máquina a dados clínicos e laboratoriais da doença falciforme já é linha de pesquisa ativa, mapeada em revisões sobre algoritmos de aprendizado de máquina em dados de pacientes com a doença⁴, detecção equitativa de hemoglobinopatias⁵ e predição de outras complicações agudas, como injúria renal aguda⁶. Nenhuma dessas revisões, porém, isola a predição de crise vaso-oclusiva a partir de dados contínuos de dispositivos vestíveis, aplicação com lógica preditiva distinta da maioria dos modelos já mapeados na doença, tipicamente baseados em dados pontuais. Diante dessa lacuna, esta revisão teve por

objetivo mapear a extensão, a natureza e as lacunas da literatura sobre predição de crises vaso-oclusivas por IA a partir de dispositivos vestíveis em pacientes com doença falciforme.

MÉTODO

Trata-se de revisão de escopo conduzida segundo a metodologia do Joanna Briggs Institute (JBI) e reportada conforme o checklist PRISMA extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR). A pergunta foi estruturada no formato População-Conceito-Contexto (PCC): população de pacientes com doença falciforme, qualquer faixa etária; conceito de predição de crise vaso-oclusiva ou dor aguda por modelos de IA/aprendizado de máquina a partir de dados de dispositivos vestíveis ou monitoramento digital contínuo; contexto de monitoramento ambulatorial ou domiciliar, sem restrição geográfica ou de idioma.

A busca foi realizada em quatro bases, PubMed/MEDLINE, LILACS/BVS, SciELO e IEEE Xplore (Tabela 1), selecionadas por cobrirem a produção biomédica geral, regional/latino-americana e de engenharia biomédica/processamento de sinal, esta última pertinente por wearables serem tema nativo de engenharia. A recuperação inicial usou estratégia ampla, sem exigir o desfecho de crise vaso-oclusiva na própria busca, com refinamento aplicado na triagem por título e resumo; o retorno do SciELO foi nulo (0 registros), limitação declarada.

Critérios de elegibilidade. Inclusão: estudo primário sobre modelo computacional preditivo (estatístico, mecanístico ou de aprendizado de máquina) aplicado a dados de dispositivo vestível ou monitoramento digital para predizer dor ou crise vaso-oclusiva em doença falciforme; qualquer desenho, idioma ou data. Exclusão: E1 ausência de termo de IA/modelo preditivo; E2 ausência de termo de wearable/monitoramento digital; E3 editorial/carta/comentário; E4 fora do domínio da doença falciforme; E5 desfecho diferente de predição de dor/crise; E6 protocolo sem dado empírico. Elementos de qualidade metodológica (desenho, grupo controle, cegamento, tamanho amostral) foram extraídos e reportados na Tabela 2, prática recomendada pela JBI ainda que não obrigatória em revisão de escopo.

A seleção ocorreu por título e resumo, por revisor único, seguida de leitura integral dos elegíveis para confirmação do desfecho exato (E5) e da presença de dado empírico (E6), já que o filtro por palavra-chave recupera com frequência estudos de IA aplicada a outras finalidades na doença falciforme, que não a predição de crise a partir de wearable.

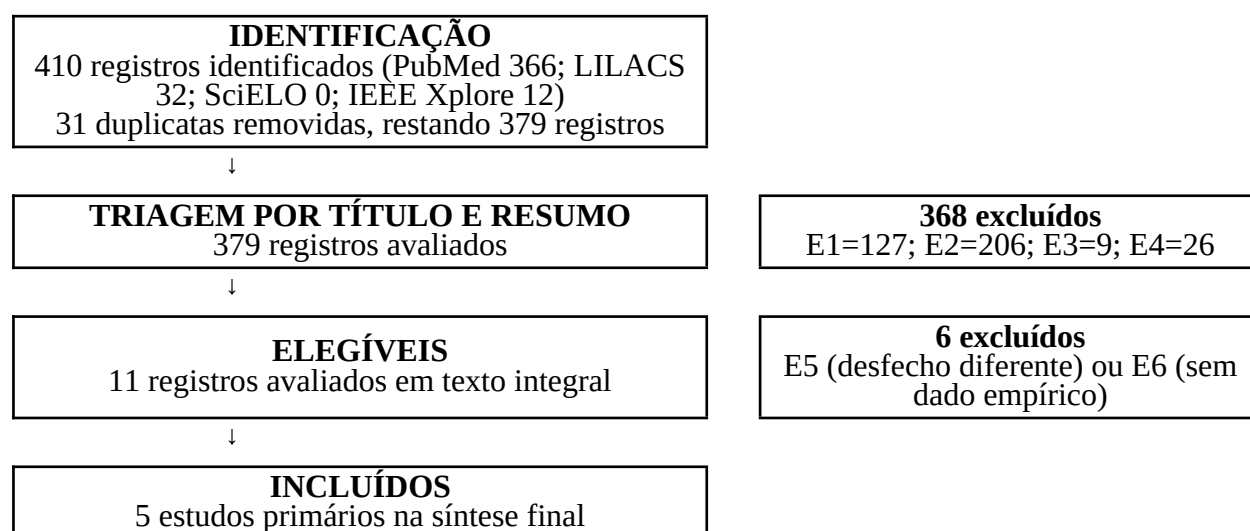
A busca identificou 410 registros (366 PubMed/MEDLINE, 32 LILACS/BVS, 0 SciELO, 12 IEEE Xplore); após remoção de 31 duplicatas, 379 avançaram à triagem por título e

resumo, que excluiu 368 (E1=127; E2=206; E3=9; E4=26), restando 11 elegíveis. A leitura integral excluiu mais 6 (E5/E6), resultando em 5 estudos incluídos na síntese final (Figura 1).

Base	Estratégia (retrieval amplo, refinamento na triagem)
PubMed/MEDLINE	("sickle cell disease"[tiab] OR "sickle cell anemia"[tiab] OR "Anemia, Sickle Cell"[Mesh]) AND ("wearable"[tiab] OR "Wearable Electronic Devices"[Mesh] OR "smartwatch"[tiab] OR "remote monitoring"[tiab] OR "digital health"[tiab] OR "mobile health"[tiab] OR "mHealth"[tiab] OR "sensor"[tiab] OR "biosensor"[tiab] OR "machine learning"[tiab] OR "artificial intelligence"[tiab] OR "deep learning"[tiab] OR "predictive model"[tiab] OR "algorithm"[tiab])
LILACS/BVS	("doença falciforme" OR "anemia falciforme") AND (wearable OR "dispositivo vestível" OR "monitoramento remoto" OR "saúde digital" OR "inteligência artificial" OR "aprendizado de máquina" OR algoritmo)
SciELO	("doença falciforme" OR "anemia falciforme") AND (wearable OR "dispositivo vestível" OR "monitoramento remoto" OR "saúde digital" OR "inteligência artificial" OR "aprendizado de máquina"); 0 resultados
IEEE Xplore	("sickle cell" AND ("wearable" OR "biosensor" OR "remote monitoring")) AND ("machine learning" OR "artificial intelligence" OR "deep learning" OR "predictive model" OR "signal processing")

Tabela 1. Estratégias de busca por base de dados, sem restrição de data ou idioma. Refinamento de especificidade (desfecho de crise vaso-oclusiva) aplicado na etapa de triagem, não na própria busca.

Figura 1. Fluxograma PRISMA-ScR.



Nota: E1 ausência de termo de IA/modelo preditivo; E2 ausência de termo de wearable/monitoramento digital; E3 editorial/carta/comentário/notícia; E4 domínio fora da doença falciforme; E5 desfecho diferente de predição de dor/crise; E6 protocolo sem dado empírico.

RESULTADOS

Os 5 estudos incluídos (Figura 1, Tabela 2) foram publicados entre 2017 e 2023, todos com origem nos Estados Unidos. Os desenhos foram estudos piloto ou de viabilidade de braço único, sem grupo controle, com amostras pequenas (de dados de 19 a 212 indivíduos), nenhum ensaio clínico randomizado. Três estudos usaram dispositivos comerciais de consumo (Apple Watch em dois, Microsoft Band 2 em um) e dois usaram sinais fisiológicos dedicados coletados por sensor de fotopletismografia (PPG).

Os dois estudos com Apple Watch, conduzidos durante internação ou visita ao day hospital por crise vaso-oclusiva, usaram frequência cardíaca, sua variabilidade e contagem de passos como entrada para modelos de random forest. Vuong et al.⁷, com 19 pacientes e 2.395

pontos de dados de dor, obtiveram acurácia de 92%, F1 de 0,63 e área sob a curva ROC de 0,9. Stojancic et al.⁸, com 20 pacientes, todos negros/afro-americanos, obtiveram acurácia de 84,5% e RMSE de 0,84, superando dois modelos nulos de comparação.

Clifton et al.⁹, de 2017, propuseram modelo híbrido estatístico-mecânico baseado em equações diferenciais e dados de aplicativo móvel, sem wearable dedicado, com teste piloto sugerindo potencial preditivo para a dinâmica da dor, sem métrica de acurácia formal. Ji et al.¹⁰, em 212 crianças, usaram stacking em dois níveis sobre padrões de PPG durante o sono, com F1 de 0,43 na predição de crise futura, superior ao modelo estatístico prévio (F1 0,33), ainda modesto pelo desbalanceamento da amostra (176 versus 36 casos de dor alta). Johnson et al.¹¹, com 27 pacientes monitorados por Microsoft Band 2 durante crise aguda, obtiveram modelo de regressão com RMSE de 1,430 e correlação de 0,706 entre dor prevista e relatada.

A sequência cronológica dos estudos acompanha a evolução da própria tecnologia de sensoriamento vestível: o modelo de 2017⁹ ainda dependia de autorrelato por aplicativo móvel, sem sensor dedicado; os estudos de 2019¹¹ e 2021¹⁰ passaram a empregar hardware específico (Microsoft Band 2 e sensor de PPG, respectivamente); e os dois estudos de 2023^{7,8} convergiram para o mesmo dispositivo de consumo, o Apple Watch, o que sugere uma tendência de padronização em torno de wearables comerciais já disponíveis ao público, e não mais de sensores de pesquisa dedicados.

Em síntese, todos os 5 estudos demonstraram viabilidade técnica de captar sinal fisiológico por wearable e associá-lo à dor relatada, com métricas de acurácia predominantemente favoráveis nos estudos com Apple Watch, mas nenhum incluiu validação externa, comparação multicêntrica ou desfecho de intervenção clínica decorrente da predição, e nenhum foi conduzido fora dos Estados Unidos.

Autor/Ano	Dispositivo/dado	N	Modelo	Principal métrica
Vuong C et al., 2023	Apple Watch (FC, VFC, passos)	19 pac. / 2.395 pontos	Random forest	Acurácia 92%; F1 0,63; AUC-ROC 0,9.
Stojancic RS et al., 2023	Apple Watch (FC, VFC, calorias)	20 pacientes	Random forest	Acurácia 84,5%; RMSE 0,84.
Clifton SM et al., 2017	App móvel (autorrelato)	Piloto, NI	Modelo híbrido estatístico-mecânico	Potencial preditivo qualitativo; sem métrica formal de acurácia.
Ji Y et al., 2021	PPG dedicado (sono)	212 crianças	Stacking ML (2 níveis)	F1 0,43 (predição futura) vs 0,35 (predição retrospectiva).
Johnson A et al., 2019	Microsoft Band 2	27 pacientes	Regressão (SVM)	RMSE 1,430; correlação r=0,706.

Tabela 2. Síntese dos 5 estudos primários incluídos, em ordem de citação no texto. NI = não informado; FC = frequência cardíaca; VFC = variabilidade da frequência cardíaca; PPG = fotopleletismografia.

CONCLUSÃO

O achado central é que a predição de crises vaso-oclusivas por IA a partir de dispositivos vestíveis é tecnicamente viável, com métricas de acurácia favoráveis nos estudos que usaram

Apple Watch, mas a base de evidência é numericamente pequena, concentrada em estudos-piloto norte-americanos de curta duração e amostra reduzida. Nenhuma revisão prévia havia sintetizado essa interseção entre predição de crise vaso-oclusiva e dado contínuo de wearable, o que sustenta a contribuição desta revisão para a organização inicial de um subcampo jovem e ainda não replicado. Um limite conceitual merece registro: 3 dos 5 estudos, incluindo os dois com melhor desempenho (Apple Watch), dependeram de dispositivos de consumo cujo acesso é condicionado por poder aquisitivo, e a amostra de um deles foi 100% composta por pacientes negros/afro-americanos em um único centro dos Estados Unidos, o que levanta a possibilidade de a evidência atual não representar igualmente pacientes de menor renda ou sistemas de saúde com menor penetração de wearables comerciais, um viés de seleção socioeconômica a monitorar.

A literatura atual não sustenta a adoção clínica desses modelos fora de contexto de pesquisa. As perspectivas futuras passam por estudos multicêntricos com amostras maiores, validação externa, desfecho de intervenção real (redução de hospitalização ou uso de opioide) e inclusão de populações socioeconomicamente diversas fora dos Estados Unidos; a seleção por revisor único e a ausência de bases pagas de alta cobertura nesta revisão reforçam a necessidade de replicação futura com metodologia mais robusta.

REFERÊNCIAS

1. Kavanagh PL, Fasipe TA, Wun T. Sick Cell Disease: A Review. *JAMA*. 2022;328(1):57-68.
2. Colombatti R, Jastaniah W, Makani J, Andemariam B. Sick cell disease. *Lancet*. 2026;407(10533):1095-1111.
3. Piel FB, Rees DC, DeBaun MR, Nnodu O, Ranque B, Thompson AA, et al. Defining global strategies to improve outcomes in sickle cell disease: a Lancet Haematology Commission. *Lancet Haematol*. 2023;10(8):e633-e686.
4. Machado TF, Neto FCB, Gonçalves MS, Barbosa CG, Barreto ME. Exploring machine learning algorithms in sickle cell disease patient data: A systematic review. *PLoS One*. 2024;19(11):e0313315.
5. Ali NT, Abdullah RS, Mehdi MAH, Ali GS, Ali HM, Gubran ANM, Al-Abd NM. AI-Augmented Hematological Signatures for Equitable Detection of Hereditary Hemolytic Anemia Carriers: A Global Systematic Review and Meta-Analysis. *Hum Mutat*. 2026;2026:9405486.
6. Zahr RS, Mohammed A, Naik S, Faradji D, Ataga KI, Lebensburger J, Davis RL. Machine Learning Predicts Acute Kidney Injury in Hospitalized Patients with Sickle Cell Disease. *Am J Nephrol*. 2024;55(1):18-24.
7. Vuong C, Utkarsh K, Stojancic R, Subramaniam A, Fernandez O, Banerjee T, et al. Use of consumer wearables to monitor and predict pain in patients with sickle cell disease. *Front Digit Health*. 2023;5:1285207.
8. Stojancic RS, Subramaniam A, Vuong C, Utkarsh K, Golbasi N, Fernandez O, et al. Predicting Pain in People With Sickle Cell Disease in the Day Hospital Using the Commercial Wearable Apple Watch: Feasibility Study. *JMIR Form Res*. 2023;7:e45355.
9. Clifton SM, Kang C, Li JJ, Long Q, Shah N, Abrams DM. Hybrid Statistical and Mechanistic Mathematical Model Guides Mobile Health Intervention for Chronic Pain. *J Comput Biol*. 2017;24(7):675-688.
10. Ji Y, Chalacheva P, Rosen CL, DeBaun MR, Coates TD, Khoo MCK. Identifying elevated risk for future pain crises in sickle-cell disease using photoplethysmogram patterns measured during sleep: A machine learning approach. *Front Digit Health*. 2021;3:714741.
11. Johnson A, Yang F, Gollarahalli S, Banerjee T, Abrams D, Jonassaint J, et al. Use of Mobile Health Apps and Wearable Technology to Assess Changes and Predict Pain During Treatment of Acute Pain in Sickle Cell Disease: Feasibility Study. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2019;7(12):e13671.