

Uso da Inteligência Artificial para Avaliação da Função Cardíaca pela Ecocardiografia: Revisão Sistemática do Estado da Arte

Use of Artificial Intelligence to Assess Cardiac Function by Echocardiography: Systematic Review of the State of the Art

Henrique Alexander Ferreira Neves,¹ Bruna Sadae Yuasa,¹ Thamires Hadassa Leite Pereira Costa,¹ Isabela Ertes Santos,¹ Yannirê Milagros Roman Benavides,¹ Marco Stephan Lofrano-Alves¹

Universidade Federal do Paraná,¹ Curitiba, PR – Brasil

Resumo

Histórico: A ecocardiografia faz parte da investigação de rotina da maioria das doenças cardíacas. No entanto, por depender do operador e considerando a qualidade da imagem obtida, é possível haver variabilidade significativa nas medições, o que prejudica a interpretação. O método avançou no sentido da padronização e incorporação de novas tecnologias com o objetivo de reduzir suas deficiências. Recentemente, parte desse avanço se deve ao uso da inteligência artificial (IA).

Objetivos: O objetivo deste trabalho foi realizar uma investigação sobre o uso da IA na avaliação da função cardíaca por meio da ecocardiografia, discutindo seu potencial para aperfeiçoar o método.

Métodos: Realizou-se uma revisão sistemática de acordo com o Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) e foram buscados artigos no período de 2000 a 2023.

Resultados: Foram incluídos 31 artigos, classificados em quatro categorias de estudos que utilizaram IA: 1) para análise de imagens e parâmetros ecocardiográficos (N = 14); 2) no processo de aquisição de imagens (N = 11); 3) para integração com dados clínicos (N = 3); e 4) para aplicação ao fluxo do exame (N = 3).

Conclusão: A IA proporciona automatização e padronização das imagens e respectivas medições que resultam em diagnósticos mais precisos, superando as limitações encontradas no método convencional. No entanto, o uso da IA ainda é uma realidade em evolução na ecocardiografia.

Palavras-chave: Ecocardiografia; Inteligência Artificial; Aprendizado de Máquina; Aprendizado Profundo; Deformação Longitudinal Global.

Abstract

Background: Echocardiography is part of the routine investigation of most heart diseases. However, its operator-dependent nature and the quality of the image obtained can cause significant variability in measurements and impair their interpretation. The method has advanced on its path of standardization and incorporation of new technologies in an attempt to reduce its deficiencies. Recently, part of this advancement was due to the incorporation of artificial intelligence (AI).

Objectives: The objective of this work was to investigate the use of AI in the assessment of cardiac function through echocardiography, discussing its potential to improve the method.

Methods: We conducted a systematic review in accordance with the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), searching for articles within the period of 2000 to 2023.

Results: A total of 31 articles were included, classified into four categories of studies that used AI: 1) for image analysis and echocardiographic parameters (N = 14); 2) in the image acquisition process (N = 11); 3) for integration with clinical data (N = 3); and 4) for application to the exam flow (N = 3).

Conclusion: AI provides automation and standardization of images and respective measurements that result in more accurate diagnoses, overcoming the limitations encountered by the conventional method. However, the use of AI is still an evolving reality within echocardiography.

Keywords: Echocardiography; Artificial Intelligence; Machine Learning; Deep Learning; Global Longitudinal Strain.

Full texts in English - <https://www.abcimaging.org/>

Correspondência: Marco Stephan Lofrano-Alves •

Universidade Federal do Paraná, Departamento de Clínica Médica. Rua Mateus Leme, 3945, apt 504. CEP: 82200-000. Curitiba, PR – Brasil.

E-mail: mslalves@hotmail.com

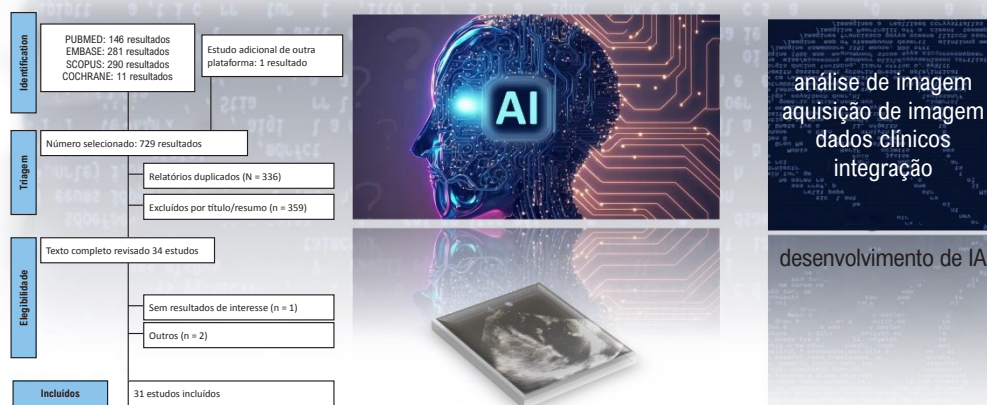
Artigo recebido em 28/10/2023; revisado em 30/10/2023; aceito em 31/10/2023.

Editor responsável pela revisão: Daniela do Carmo Rassi Frota

DOI: <https://doi.org/10.36660/abcimg.20230085>

Figura Central: Uso da Inteligência Artificial para Avaliação da Função Cardíaca pela Ecocardiografia: Revisão Sistemática do Estado da Arte

Utilização de IA para avaliar a função cardíaca por ecocardiografia



Arq Bras Cardiol: Imagem cardiovasc. 2023;36(4):e20230085

Fluxograma de busca e seleção de estudos sobre o uso de IA na ecocardiografia. IA: inteligência artificial

Introdução

A ecocardiografia é o método de imagem mais solicitado na Cardiologia e faz parte da investigação de rotina da maioria das doenças cardíacas. Devido à sua natureza não invasiva, não ionizante, alta disponibilidade e portabilidade, o método está presente em vários cenários clínicos: ambulatoriais, hospitalares, unidades de urgência e emergência, unidades de terapia intensiva e como guia para procedimentos intervencionistas e cirúrgicos. Normalmente, é a primeira opção para acessar a anatomia e função cardíacas. No entanto, a dependência do operador e a qualidade da imagem podem influenciar as medições ecocardiográficas. Desde seu desenvolvimento, o método tem avançado no sentido da padronização e incorporação de novas tecnologias com o objetivo de reduzir sua variabilidade.

Este avanço se deve, em parte, ao uso da inteligência artificial (IA). "IA" é um termo amplo cunhado por Arthur Samuel na década de 1960. Aplica-se a qualquer programa de computador, como algoritmos e modelos, que imitam a lógica e a inteligência humanas.¹ Na ecocardiografia, o primeiro uso foi na década de 1970, quando a análise de Fourier foi utilizada para avaliar a válvula mitral com o auxílio do modo M.² As medições semiautomatizadas já fazem parte da prática laboratorial ecocardiográfica de hoje. Em seu fluxo de trabalho, os dispositivos modernos vêm equipados com pacotes de software que auxiliam nas medições e cálculos, como a fração de ejeção do ventrículo esquerdo (FEVE), a deformação miocárdica (strain) e o estudo Doppler para avaliação hemodinâmica.¹

O aprendizado de máquina é um dos subcampos da IA. O computador recebe os dados, aprende com eles, prevê um resultado e, utilizando métodos estatísticos, pode até melhorar o seu desempenho na próxima vez que lhe forem apresentados dados semelhantes. Isso permite, por exemplo, que uma máquina treinada identifique estruturas dentro de uma nova imagem e as identifique com precisão. Outro subcampo surgiu posteriormente: o *deep learning*, ou aprendizado profundo. Ele é aplicado quando se deseja processar uma grande quantidade de dados. Neste caso, os dados são tratados como grandes subconjuntos. Assim como em uma rede neural biológica, o processamento é organizado em uma cadeia oculta composta por milhares de camadas neurais artificiais consecutivas até que um resultado final seja alcançado.¹ Uma rede neural artificial pode usar operações de convolução, que permitem que um terceiro dado seja gerado a partir de dois dados de entrada, chamadas redes neurais convolucionais.³

Nesse sentido, a IA na ecocardiografia pode ser extremamente vantajosa para identificar, quantificar e interpretar imagens, minimizar a variação entre as avaliações, fornecer medições reprodutíveis e fornecer um diagnóstico preciso. O examinador pode encontrar grande suporte nesta tecnologia, o que permitiria reduzir o tempo gasto na extração e integração de dados, ficando evidente o potencial de tornar o sistema de saúde mais sustentável.⁴ Além disso, a prática ecocardiográfica orientada por IA não apenas simplificaria a tomada de decisões clínicas, mas também forneceria métodos de aprendizagem com feedback interativo para treinar examinadores menos experientes.⁵

Assim, o uso da IA na ecocardiografia pode ser dividido em quatro cenários principais: educação, aquisição de imagens, análise de imagens e integração com dados clínicos.⁶ Embora existam evidências positivas sobre o papel da tecnologia de IA no diagnóstico ecocardiográfico, ainda há desafios a serem superados, como a padronização insuficiente dos protocolos ecocardiográficos e a generalização insuficiente dos modelos em aplicações clínicas.⁶

Dadas as limitações da técnica e a necessidade de investigar tendências futuras, a presente revisão sistemática foi realizada com base em diversos estudos para validar externamente o desempenho da tecnologia de IA na ecocardiografia. Embora trabalhos semelhantes sejam encontrados na literatura que investigaram a aplicação da IA na análise automatizada de imagens ecocardiográficas, este estudo procurou realizar um levantamento das inovações na área com ênfase nos últimos cinco anos para explorar o uso da IA na ecocardiografia, analisando as evidências atuais de sua eficácia e discutindo seu potencial para melhorar o cuidado cardíaco.

Métodos

Trata-se de uma revisão sistemática de acordo com o Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA).⁷ Foram pesquisados artigos nas bases de dados MEDLINE, EMBASE, SCOPUS e Cochrane Central de janeiro de 2000 a março de 2023, sem restrições de idiomas, sendo o nosso método alvo a ecocardiografia, cuja intervenção é o uso de IA durante alguma fase do exame, com textos completos e descritores presentes no título ou resumo do artigo. Os seguintes descritores em inglês foram utilizados para a pesquisa: ("Artificial Intelligence") E ("Echocardiography") E ("Function" OU "Strain"). Também verificamos as referidas bases de dados quanto à presença de revisões sistemáticas anteriores ou em curso sobre o assunto. Foram combinados resultados de diferentes bases de dados e resultados duplicados foram descartados com uso do software Zotero. Dois investigadores (H.A.F.N. e B.S.Y.) realizaram a pesquisa de forma independente e cinco investigadores chegaram a um acordo sobre a elegibilidade dos estudos (H.A.F.N., B.S.Y., T.H.L.P.C., I.E.S. e Y.M.R.B.). Inicialmente, foi realizada uma primeira triagem para identificar estudos que avaliaram o uso de qualquer tipo de IA durante o exame ecocardiográfico. Em uma segunda etapa, selecionamos os artigos a serem lidos na íntegra por meio da plataforma Rayyan e avaliamos a relevância dos dados, bem como se havia mais de um artigo avaliando a mesma coorte de pacientes. Uma terceira etapa consistiu em rever as referências dos artigos selecionados para obter outras fontes não reveladas na pesquisa digital. Classificamos os estudos de acordo com seu desenho (caso-controle, randomizado, coorte retrospectiva, coorte prospectiva, relato de caso), em relação ao objetivo principal do uso de IA e ao principal resultado encontrado no estudo. Para cada estudo, foram extraídas as seguintes informações: primeiro autor; instituição do estudo; data de início e fim; ano de publicação; centro único ou multicêntrico; características da população estudada (idade média, distribuição por sexo); parâmetros ecocardiográficos avaliados; métodos e janelas utilizados para avaliar a função cardíaca; modelo de IA; desenho do estudo; conclusões do estudo.

Resultados

Foram identificadas 729 referências em pesquisas em bases de dados eletrônicas, descartando-se 336 repetições e outros 359 resultados que foram excluídos por título e/ou resumo. Obtivemos 33 artigos para leitura completa, dos quais três foram descartados por não se enquadrarem no escopo da revisão segundo os autores. Apenas um artigo adicional foi incluído após pesquisa manual das referências (Figura 1). Um total de 31 artigos foram incluídos na análise qualitativa desta revisão, sendo classificados em quatro categorias principais: 1) estudos que utilizam IA para análise de imagens e parâmetros ecocardiográficos (N = 14, Tabela 1); 2) estudos que utilizam IA no processo de aquisição de imagens (N = 11, Tabela 2); 3) estudos que utilizam IA para integração com dados clínicos (N = 3, Tabela 3); e 4) estudos que treinaram software de IA para aplicação ao fluxo do exame (N = 3, Tabela 4); todos os artigos foram publicados em inglês. Vinte e seis artigos são provenientes de um único centro, sendo 7 (%) dos Estados Unidos, 2 (%) de Israel, 2 (%) da Noruega, 2 (%) da Itália, 2 (%) da Inglaterra, 1 (%) da Alemanha, 1 (%) da Grécia, 1 (%) da França, 1 (%) do Uganda, 1 (%) de Portugal, 1 (%) da Irlanda, 1 (%) da Áustria, 1 (%) dos Países Baixos, 1 (%) da China, 1 (%) do Canadá e 1 (%) do Japão. Um único artigo foi desenvolvido em diversos centros (13 centros diferentes). Quatro artigos não informaram o país onde o estudo foi realizado.

Discussão

A implementação de ferramentas de IA no estudo ecocardiográfico pode melhorar o atendimento ao paciente, bem como otimizar o diagnóstico e o tratamento. Os estudos incluídos nesta revisão sistemática são favoráveis à aplicação da tecnologia automatizada na rotina do exame devido à sua similaridade, viabilidade, utilidade, precisão, exatidão e reprodutibilidade comparáveis à avaliação manual. Embora o uso de IA no exame ainda seja limitado e, portanto, propenso a modificações que visem avançar e aperfeiçoar o método, o benefício que a tecnologia representa para a ecocardiografia parece superar quaisquer receios ou desvantagens.

Análise de imagem e parâmetros ecocardiográficos

A medição automatizada realizada por IA de parâmetros como FEVE e strain longitudinal global (SLG) pode ser comparável à medição manual por ultrassonografistas experientes e o uso dessas ferramentas preservou a precisão da medição de forma confiável.⁸⁻¹³ Isso é relevante devido aos benefícios adicionais oferecidos: maior eficácia operacional do exame e qualidade da consistência das análises;⁶ menos variabilidade entre diferentes examinadores,¹⁴⁻¹⁸ superando limitações humanas como cansaço ou distração; e maior reprodutibilidade do exame.¹

Aquisição de imagem

Grande parte da literatura se concentra na interpretação ou análise pela IA de imagens já adquiridas, mas há evidências crescentes sobre o uso da tecnologia de IA para aquisição de imagens por não especialistas.^{5,19-24} A tecnologia automatizada pode orientar um examinador não especialista, reconhecendo

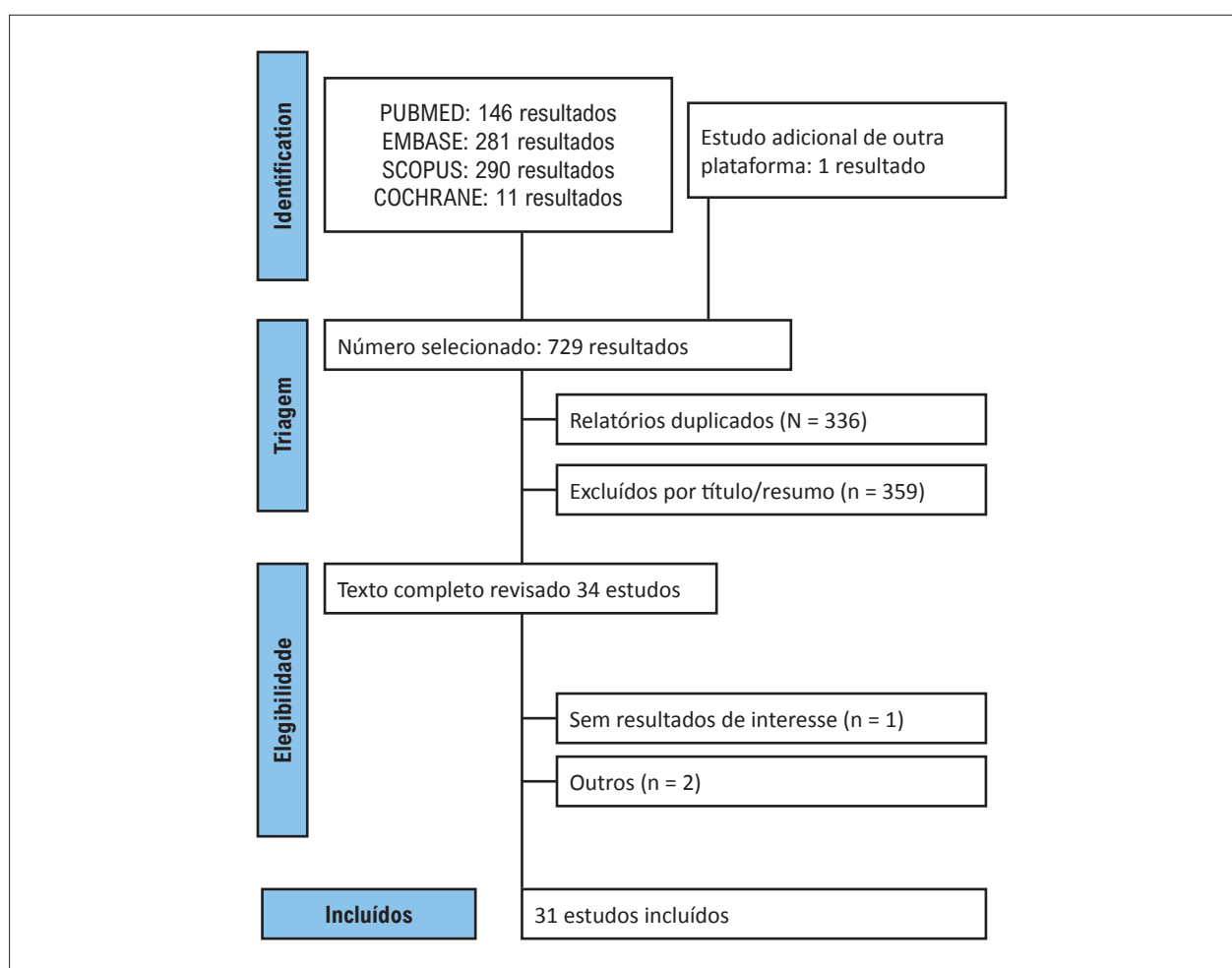


Figure 1 – PRISMA flow diagram of study screening and selection

imagens incorretas e a necessidade de visualizações ou melhorias adicionais. Também pode ajudar a padronizar a aquisição de imagem e as medições.^{1,6} Dessa forma, seria uma ferramenta utilizada para otimizar o treinamento e os estudos ecocardiográficos,^{5,25,26} sendo possível adquirir imagens de qualidade diagnóstica comparáveis às adquiridas manualmente por especialistas.^{5,19,20,22-24} A tecnologia é aplicável na prática clínica, em emergências e em áreas remotas com recursos escassos e poucos profissionais experientes.^{5,21,25,27}

Integração com dados clínicos

No campo da ecocardiografia, a interpretação dos achados dos exames é necessária para melhorar o cuidado e o monitoramento dos pacientes. Assim, o treinamento de softwares de IA para associar dados de imagem a dados clínicos do paciente permite obter informações de diagnóstico relevantes sem a necessidade de habilidades avançadas de análise por um especialista e sem despendendo tempo e recursos. A correlação com anomalias funcionais, estados patológicos, previsão de desfechos e estratificação de risco são exemplos dos benefícios que a integração entre algoritmos e dados

clínicos pode oferecer. Os resultados apresentados pelo estudo de Kusunose *et al.* apoiam a possibilidade de utilização de software de IA para o diagnóstico automatizado de anomalias funcionais, e o estudo de O'Driscoll *et al.* para o cálculo da FEVE e do SLG.^{28,29} No futuro, a integração de softwares de IA com dados clínicos pode possibilitar a formulação de terapias personalizadas para cada paciente.

Desenvolvimento da IA

Bases de dados de estudos ecocardiográficos foram utilizadas para treinar protocolos e algoritmos de aprendizado profundo para detectar disfunção cardíaca, identificar anomalias anatômicas e definir fluxos de trabalho.³⁰⁻³² Após o treinamento, a precisão observada foi semelhante à precisão obtida com metodologias convencionais. Esta validação é indispensável, pois no desenvolvimento de softwares de IA, tanto o software quanto as imagens provêm de fornecedores externos. A qualidade das imagens utilizadas é um ponto relevante, uma vez que, caso os dados inseridos sejam de baixa qualidade, tendenciosos ou restritos, a interpretação pelo algoritmo também será. Um desafio futuro será desenvolver algoritmos de aprendizado profundo que

Tabela 1 – Estudos que utilizam IA para análise de imagens

Autor/ano	País	Desenho e objetivo	N	Parâmetros avaliados	Modelo de IA	Principais resultados
Cotella <i>et al.</i> , 2023 ⁸		Coorte retrospectiva Avaliar o cálculo da FEVE e do SLG feito pela IA em pacientes com amiloidose	51	FEVE, SLG	EchoGo Core 2.0, Ultramics	A FEVE e o SLG calculados por IA totalmente automatizada são comparáveis às medições manuais em pacientes com amiloidose cardíaca.
Sveric <i>et al.</i> , 2023 ¹⁴	Alemanha	Coorte prospectiva Investigar a viabilidade da IA para o cálculo da FEVE no fluxo de trabalho	889	FEVE	LVivo Seamless™	A aplicação baseada em IA identificou automaticamente as janelas apicais padrão do VE e mediu a FEVE. Produziu resultados semelhantes aos do método biplano de Simpson modificado atualmente utilizado e pode melhorar a quantificação da FEVE.
He <i>et al.</i> , 2023 ⁹	EUA	Estudo clínico randomizado Comparar a avaliação inicial da FEVE pelo ultrassonografista e pela IA	3495	FEVE	EchoNet-Dynamic	Os cardiologistas não conseguiram distinguir as avaliações iniciais realizadas pela IA e pelo ultrassonografista. A avaliação inicial da FEVE por IA não foi inferior à avaliação por ultrassonografistas.
Wang <i>et al.</i> , 2022 ¹⁵	EUA	Coorte retrospectiva Avaliar a usabilidade de um software de IA em pacientes com COVID-19	50	FEVE, SLG, VDF, VSF	EchoGo, Ultramics	Os resultados apresentados pelo software EchoGo demonstraram correlações elevadas com os volumes do ventrículo esquerdo e correlações moderadas com a FEVE e o SLG em comparação com as medições padrão de ecocardiograma transtorácico.
Liel-Cohen <i>et al.</i> , 2022 ¹⁶	Israel	Coorte retrospectiva Avaliar a capacidade da IA de identificar projeções e comparar os resultados do SLG com os métodos convencionais	100	SLG	LVivo Seamless™	Os resultados fornecidos pela solução LVivo Seamless baseada em IA demonstraram excelente capacidade para identificar automaticamente as projeções 4CH, 2CH e 3CH, juntamente com excelentes resultados referentes ao SLG em comparação com imagens funcionais automatizadas.
Papadopoulou <i>et al.</i> , 2022 ¹⁰	-	Coorte retrospectiva Avaliar a precisão de um novo HUD com algoritmo assistido por IA para calcular automaticamente a FEVE	100	FEVE	Auto EF, Vivid™	O algoritmo autoEF assistido por IA em um novo HUD é capaz de calcular com precisão a FEVE em tempo real, em comparação com o método biplano manual de Simpson recomendado, empregado em sistemas fixos em uma população geral de pacientes.
Salte <i>et al.</i> , 2021 ¹¹	Noruega	Coorte retrospectiva Examinar medições automatizadas do SLG utilizando aprendizado profundo e IA e comparar com métodos convencionais	200	SLG	EchoPAC SWO v.202, GE Ultrasound	Medições totalmente automatizadas do SLG por meio de uma nova tecnologia de aprendizado profundo baseada em IA para estimativa de movimento são viáveis e rápidas e produzem resultados comparáveis àqueles obtidos com o software semiautomatizado mais utilizado.
Hanif <i>et al.</i> , 2021 ³³	-	Transversal Testar se a medição do strain por IA pode ser mais confiável em comparação com a interpretação humana	52	SLG	EchoGo, Ultramics	A análise do strain longitudinal por IA foi viável na maioria dos ecocardiogramas sem qualquer intervenção do operador. O viés entre o strain longitudinal medido pelo EchoGo e pelo software convencional parece ser pequeno.
Penso <i>et al.</i> , 2022 ¹²	Itália	Transversal Viabilidade, comparação e avaliação da medição do strain por IA em comparação com métodos convencionais	203	FEVR, SLPLVD	3D Auto RV, Philips Medical Systems	A rápida análise e a excelente reprodutibilidade da análise do ventrículo direito em ecocardiograma 3D por IA fundamentam o uso rotineiro do sistema.
Di Candia <i>et al.</i> , 2022 ¹⁷	Itália	Transversal Comparar os resultados de uma análise totalmente automatizada e de uma análise manual do traçado utilizando um novo software de IA	28	FEVE	IA Simpson e IA Wall Motion Tracking (Rastreo do Movimento de Parede)	A análise totalmente automatizada por IA revelou-se tecnicamente simples, menos demorada e altamente reprodutível. Isso reduz a variabilidade das medições manuais entre diferentes ultrassonografistas e em momentos diferentes.
Papadopoulou <i>et al.</i> , 2022 ¹⁰	Grécia	Transversal Avaliar a confiabilidade e a precisão do diagnóstico de um HUD assistido por IA para calcular automaticamente a fração de ejeção	100	FEVE	Kosmos autoEF	A utilização de um novo HUD assistido por IA forneceu resultados de FEVE semelhantes aos obtidos pelo método biplano manual de Simpson em sistemas fixos e demonstra potencial clínico.

Popoff <i>et al.</i> , 2020 ¹⁸	França	Transversal Avaliar a precisão e reprodutibilidade da ferramenta de IA para calcular volumes do VE e FE em comparação com a ressonância magnética cardíaca como referência	114	FEVE	Um modelo de redes neurais convolucionais profundas	Em comparação com o contorno manual, o volume ventricular esquerdo e a FE por IA demonstraram precisão comparável ou melhor e maior reprodutibilidade. Esses resultados demonstram o valor das ferramentas de IA, com potencial para automação total, para avaliação objetiva e acompanhamento da função cardíaca.
Asch <i>et al.</i> , 2021 ¹³	EUA	Coorte prospectiva Determinar se as estimativas automatizadas feitas por IA podem ser utilizadas para classificar com precisão a função do VE	233	FEVE	Algoritmo de aprendizado de máquina, Caption Health	O novo algoritmo de aprendizado de máquina permite uma avaliação precisa e automatizada da função do VE a partir de projeções ecocardiográficas comumente utilizadas à beira leito. Esta abordagem permitirá que mais profissionais à beira leito avaliem com precisão a função do VE.

VDF: volume diastólico final do ventrículo esquerdo; SLG: strain longitudinal global; FEVE: fração de ejeção do ventrículo esquerdo; IA: inteligência artificial; EF: fração de ejeção automática; A4C: apical quatro câmaras; A2C: apical duas câmaras; VD: ventrículo direito; LVOT-VTI: via de saída do ventrículo esquerdo integral da velocidade-tempo; PLAX: corte paraesternal eixo longo; corte paraesternal eixo curto; IVC: veia cava inferior; 4CH: 4 câmaras; 2CH: 2 câmaras; 3CH: 3 câmaras

Tabela 2 – Estudos que utilizam IA para aquisição de imagens.

Autor/ano	País	Desenho e objetivo do estudo	N	Parâmetros avaliados	Modelo de IA	Principais resultados
Peck <i>et al.</i> , 2023 ²⁵	Uganda	Transversal. Avaliar a capacidade de não especialistas em obter imagens de qualidade diagnóstica em pacientes com cardiopatia reumática empregando orientação por IA com Doppler colorido	50	Presença / ausência de cardiopatia reumática, morfologia anormal da válvula mitral e regurgitação mitral	-	A orientação por IA com Doppler colorido é viável para permitir a triagem de cardiopatia reumática por não especialistas, com desempenho significativamente melhor para avaliação da válvula mitral do que da aórtica.
Klempfner <i>et al.</i> , 2023 ⁵	EUA	Coorte prospectiva. Determinar a precisão diagnóstica de estudos ecocardiográficos obtidos por usuários inexperientes guiados por um algoritmo de IA	240	Dimensão e função do ventrículo esquerdo e direito, derrame pericárdico, morfologia valvar, dimensão da atrial esquerda e da veia cava inferior	Algoritmo UltraSight	Após treinamento mínimo com um novo software de orientação por IA, usuários inexperientes conseguiram adquirir imagens em 10 projeções ecocardiográficas cardíacas padrão com qualidade diagnóstica que se aproxima daquela obtida por ultrassonografistas especialistas.
Dadon <i>et al.</i> , 2022 ²⁷	Israel	Ensaio clínico randomizado avaliar o uso da IA como uma ferramenta didática para melhorar a avaliação da FEVE por clínicos-gerais não cardiologistas a partir da projeção A4C	-	FEVE	LVivo EF	O uso de uma ferramenta de IA por clínicos-gerais que trabalham no serviço de emergência melhorou a precisão da avaliação da FEVE em comparação com o grupo de controle.
Varudo <i>et al.</i> , 2022 ¹⁹	Portugal	Coorte prospectiva. Comparar as medições em tempo real realizadas por profissionais inexperientes e por especialistas com as medições de referência da FEVE realizadas manualmente por ecografistas	95	FEVE	Algoritmo EF em Tempo Real	As medições em tempo real da FEVE por aprendizado de máquina apresentaram forte correlação com as medições manuais realizadas por especialistas.
Burke <i>et al.</i> , 2022 ²⁰	Irlanda	Transversal. Avaliar a qualidade do estudo por profissionais inexperientes com orientação por IA	120	Qualidade da imagem para determinar a FEVE, derrame pericárdico	Sistema Caption AI	A tecnologia Caption AI permite, com segurança, que profissionais inexperientes realizem ecocardiogramas eficientes e precisos à beira leito em diferentes contextos clínicos que sejam comparáveis aos realizados por profissionais especializados.

Narang <i>et al.</i> , 2021 ²¹	EUA	Coorte prospectiva. Testar se profissionais inexperientes conseguem obter estudos ecocardiográficos transtorácicos de 10 projeções de qualidade diagnóstica utilizando um software de aprendizado profundo	240	Tamanho do ventrículo esquerdo, função, derrame pericárdico e tamanho do ventrículo direito	Orientação Software Caption	O algoritmo de aprendizado profundo permite que iniciantes sem experiência em ultrassonografia obtenham estudos ecocardiográficos transtorácicos para fins de diagnóstico, para avaliação do tamanho e função do ventrículo esquerdo, tamanho do ventrículo direito e presença de derrame pericárdico não trivial.
Surette <i>et al.</i> , 2020 ²²	EUA	Ensaio clínico multicêntrico prospectivo. Avaliar se as imagens adquiridas por iniciantes com orientação do software foram de qualidade diagnóstica em pacientes com e sem dispositivos eletrofisiológicos implantados	240	Tamanho e função do ventrículo direito	-	O novo software de aprendizado profundo pode orientar profissionais inexperientes a realizar ecocardiogramas transtorácicos que permitam a avaliação qualitativa do tamanho do VD, mesmo na presença de dispositivos eletrofisiológicos implantados.
Schneider <i>et al.</i> , 2020 ²³	Áustria	Transversal. Avaliar se o novo algoritmo de aprendizado de máquina pode ajudar operadores inexperientes a adquirir loops de imagem de diagnóstico	14	FEVE	-	O algoritmo de aprendizado de máquina pode orientar ultrassonografistas inexperientes a adquirir loops de eco de diagnóstico e fornecer um cálculo automatizado da FEVE que seja comparável ao realizado por um especialista humano.
Motazedian <i>et al.</i> , 2022 ²⁴	Holanda	Coorte prospectiva. Determinar a precisão da FEVE em exame US à beira leito guiado por IA em comparação com o ecocardiograma transtorácico formal	449	FEVE	EchoNous Kosmos	A US à beira leito assistida por IA realizada por profissionais inexperientes e experientes pode determinar com precisão a FEVE em comparação com um ecocardiograma transtorácico abrangente.
Zhai <i>et al.</i> , 2022 ²⁶	China	Transversal. Identificar o grau de correlação entre LVOT-VTI automatizada e LVOT-VTI manual realizado por médicos especialistas em US à beira leito	46	LVOT/VTI	Software de IA	A IA pode fornecer orientação em tempo real a operadores iniciantes que não possuem experiência para adquirir a projeção padrão ideal.
Fung <i>et al.</i> , 2019 ³⁴	Canadá	Coorte prospectiva. Avaliar a precisão do sistema de IA para avaliar a qualidade da imagem em comparação com a análise subjetiva realizada por especialistas	53	PLAX, PSAX, A2C, A4C e IVC subcostal	-	O sistema de IA é capaz de avaliar a qualidade da imagem com precisão modesta.

A2C: apical duas câmaras; A4C: apical quatro câmaras; IVC: veia cava inferior; FEVE: fração de ejeção do ventrículo esquerdo; LVOT-VTI: via de saída do ventrículo esquerdo integral da velocidade-tempo; PLAX: corte paraesternal eixo longo; PSAX: corte paraesternal eixo curto; VD: ventrículo direito; SLG: strain longitudinal global; VDF: volume diastólico final do ventrículo esquerdo; VSF: volume sistólico final do ventrículo esquerdo; HUD: dispositivo de ultrassom portátil; AutoEF: fração de ejeção automática; FEVR: fração de ejeção do ventrículo direito; SLPLVD: strain longitudinal da parede livre do ventrículo direito; US: ultrassonografia.

possam ser empregados em diferentes equipamentos, possuam nomenclaturas padrão e armazenem e recuperem dados de forma independente do fornecedor.¹

A incorporação da IA na prática clínica levanta preocupações éticas principalmente relacionadas à responsabilidade, à medida que o cuidado se torna mais indireto, e à transparência, conforme se questiona a extensão daquilo que deve ser informado ao paciente e por ele consentido. É importante lembrar que o uso da IA já faz parte da rotina das pessoas e esse tipo de tecnologia está cada vez mais disponível para a sociedade. Esta interação tende a ser irreversível e, certamente, não será diferente na prática médica e na ecocardiografia. Mesmo assim, não se trata de uma competição entre humanos e máquinas. Não conseguimos imaginar um cenário no qual um substitua o outro. Pelo contrário, a IA está a favor do médico e contra a obscuridade das limitações sistêmicas e humanas, tais

como: alta demanda, falta de especialistas, ergonomia e esgotamento dos serviços. Especialmente porque, ao aumentar a eficácia operacional do exame, as habilidades do médico especialista podem ser empregadas de forma mais eficiente. Espera-se que o uso da IA ajude a democratizar o acesso ao exame, representando um avanço na assistência à saúde.

A presente revisão sistemática possui limitações. Em primeiro lugar, a grande maioria dos estudos tem um desenho transversal. No entanto, como nosso objetivo era a validação diagnóstica, estudos com esse desenho são suficientes para demonstrar a não inferioridade dos métodos. Os desenhos que estudam medidas de associação em longo prazo podem esclarecer melhor os benefícios da IA para a qualidade do acompanhamento longitudinal dos pacientes. Em segundo lugar, os softwares de IA geralmente necessitam de uma qualidade mínima de imagem. Por

Tabela 3 – Estudos que utilizam IA para integração com dados clínicos

Autor/ ano	País	Desenho e objetivo do estudo	N	Parâmetros avaliados	Modelo de IA	Principais resultados
Kusunose <i>et al.</i> , 2019 ³⁵	Japão	Coorte prospectiva. Investigar se uma DCNN poderia detectar RWMAs com mais eficiência	300	Presença de anomalias do movimento da parede	ResNet, DenseNet, Inception-ResNet, Inception e Xception	Os resultados apoiam a possibilidade de utilizar DCNN para o diagnóstico automatizado de RWMAs no campo da ecocardiografia.
O'Driscoll <i>et al.</i> , 2022 ²⁸	Inglaterra	Coorte retrospectiva. Avaliar se a FEVE e o SLG, calculados automaticamente pela IA, aumentam o desempenho diagnóstico da ecocardiografia sob estresse para a detecção de DAC	512	FEVE e SLG em repouso e stress	EchoGo Core 1.0, Ultramics	O cálculo da FEVE e do SLG por IA por meio do contorno em ecocardiografias sob estresse com e sem contraste, em repouso e sob estresse, é viável e melhora independentemente a identificação da DAC obstrutiva para além dos métodos convencionais.
Asch <i>et al.</i> , 2022 ³⁶	Multicêntrico	Coorte prospectiva. Testar a hipótese de que a análise por IA de imagens ecocardiográficas poderia prever a mortalidade com mais precisão do que a análise convencional por um especialista humano	870	FEVE, SLVE	EchoGo Core, Ultramics	A análise por IA da FEVE e do SLVE apresentou viabilidade semelhante à análise manual e as análises por IA, mas não as manuais, foram um fator significativo de predição de mortalidade hospitalar e durante período de acompanhamento.

DAC: doença arterial coronariana; DCNN: rede neural convolucional profunda; SLG: strain longitudinal global; FEVE: fração de ejeção do ventrículo esquerdo; SLVE: strain longitudinal do ventrículo esquerdo; RWMAs: anormalidades no movimento regional da parede; SE: ecocardiograma sob estresse; IA: inteligência artificial.

Tabela 4 – Estudos que desenvolveram uma IA

Autor e ano	País	Desenho e objetivo do estudo	Número de pacientes	Parâmetros avaliados	Modelo de IA	Principais resultados
Asch <i>et al.</i> , 2019 ³²	EUA	Transversal Desenvolver um algoritmo e testar sua viabilidade e precisão para quantificação automatizada da FEVE por um computador especialista bem treinado em comparação à referência	99	FEVE	AutoEF (BayLabs)	O algoritmo de aprendizado de máquina para a estimativa da FEVE que evita a segmentação de imagens e as medições de volume é altamente viável e pode produzir resultados estritamente comparáveis aos obtidos por profissionais experientes utilizando a metodologia convencional.
Stowell <i>et al.</i> , 2021 ³⁰	Inglaterra	Transversal Desenvolver um método baseado em aprendizado de máquina, treinado e validado por especialistas credenciados da AI Echocardiography Collaborative	-	Strain longitudinal do ventrículo esquerdo	-	A medição de strain por IA de código aberto e independente do fornecedor automaticamente produz valores compatíveis com o consenso de especialistas e com os obtidos por especialistas individualmente.
Tromp <i>et al.</i> , 2021 ³¹	Cingapura	Transversal Desenvolver um fluxo de trabalho de aprendizado profundo totalmente automatizado para classificar, segmentar e anotar vídeos bidimensionais e modalidades Doppler em ecocardiogramas	-	-	-	Os algoritmos de aprendizado profundo podem anotar automaticamente vídeos 2D e modalidades Doppler com precisão semelhante às medições manuais por ultrassonografistas especializados.

AutoEF: fração de ejeção automática; FEVE: fração de ejeção do ventrículo esquerdo; IA: inteligência artificial.

vezes, pacientes com janelas ruins foram excluídos.^{10,14,15} Em diversos estudos, as imagens analisadas foram coletadas em cenários ideais por especialistas experientes ou faziam parte de pacotes provenientes de centros de fornecedores. É necessário realizar estudos maiores com imagens de baixa qualidade, especialmente em pacientes com janelas ruins, hemodinamicamente instáveis ou em ambientes não ideais (UTI, emergência). Em terceiro lugar, a maioria dos softwares consegue medir um número limitado de parâmetros. Assim, estudos adicionais podem validar os benefícios do uso da IA além dos parâmetros estudados nesta revisão.

Conclusão

O uso de IA na área da ecocardiografia provou ser um método altamente eficaz e preciso em quatro domínios principais (Figura Central). A IA proporciona a automatização e padronização das imagens e respectivas medições, o que proporciona diagnósticos mais precisos, superando as limitações encontradas na manipulação por ultrassonografistas humanos. Além disso, a IA também provou ser um instrumento facilitador para a obtenção de resultados satisfatórios, mesmo quando utilizada por não especialistas. As vantagens oferecidas pela IA tornam o exame muito mais rápido e acessível, uma vez que a duração da formação de um profissional especializado é um dos desafios da disponibilidade de exames na saúde pública. Portanto, tendo em vista os fatos mencionados, a IA é um recurso favorável que pode ser altamente implementado nos serviços de ecocardiografia, pois as vantagens apresentadas pelo método abrangem diferentes dimensões, desde a precisão

dos resultados e integração de dados para correlação clínica até a prevenção de doenças ergonômicas relacionadas ao trabalho do ultrassonografista.

Contribuição dos Autores

Concepção e desenho da pesquisa, obtenção de dados e análise e interpretação dos dados: Neves HAF, Yuasa BS, Costa THLP, Santos IE, Benavides YMR, Lofrano-Alves MS; redação do manuscrito: Neves HAF, Yuasa BS, Costa THLP, Santos IE, Benavides YMR; revisão crítica do manuscrito quanto ao conteúdo intelectual importante: Lofrano-Alves MS.

Potencial Conflito de Interesse

Declaro não haver conflito de interesses pertinentes.

Fontes de Financiamento

O presente estudo não teve fontes de financiamento externas.

Vinculação Acadêmica

Não há vinculação deste estudo a programas de pós-graduação.

Aprovação Ética e Consentimento Informado

Este artigo não contém estudos com humanos ou animais realizados por nenhum dos autores.

Referências

1. Davis A, Billick K, Horton K, Jankowski M, Knoll P, Marshall JE, et al. Artificial Intelligence and Echocardiography: A Primer for Cardiac Sonographers. *J Am Soc Echocardiogr.* 2020;33(9):1061-6. doi: 10.1016/j.echo.2020.04.025.
2. Chu WK, Raeside DE. Fourier Analysis of the Echocardiogram. *Phys Med Biol.* 1978;23(1):100-5. doi: 10.1088/0031-9155/23/1/009.
3. Akkus Z, Aly YH, Attia IZ, Lopez-Jimenez F, Arruda-Olson AM, Pellikka PA, et al. Artificial Intelligence (AI)-Empowered Echocardiography Interpretation: A State-of-the-Art Review. *J Clin Med.* 2021;10(7):1391. doi: 10.3390/jcm10071391.
4. Alsharqi M, Woodward WJ, Mumith JA, Markham DC, Upton R, Leeson P. Artificial Intelligence and Echocardiography. *Echo Res Pract.* 2018;5(4):R115-R125. doi: 10.1530/ERP-18-0056.
5. Klempfner RV, Lang RM, Mor-Avi V, Guile B, Hipke K, Cotella JJ, et al. Novel Artificial Intelligence Guidance Algorithm Enables Acquisition by Novices of Diagnostic Quality Echocardiographic Images. *J Am Coll Cardiol.* 2023;81(8):1401. doi: 10.1016/S0735-1097(23)01845-4.
6. Thachil R, Hanson D. Artificial Intelligence in Echocardiography: A Disruptive Technology for Democratizing and Standardizing Health. *J Am Soc Echocardiogr.* 2022;35(8):A14-A16. doi: 10.1016/j.echo.2022.06.001.
7. Helbach J, Hoffmann F, Pieper D, Allers K. Reporting According to the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses for Abstracts (PRISMA-A) Depends on Abstract Length. *J Clin Epidemiol.* 2023;154:167-77. doi: 10.1016/j.jclinepi.2022.12.019.
8. Cotella JJ, Slivnick JA, Sanderson E, Singulane C, O'Driscoll J, Asch FM, et al. Artificial Intelligence Based Left Ventricular Ejection Fraction and Global Longitudinal Strain in Cardiac Amyloidosis. *Echocardiography.* 2023;40(3):188-95. doi: 10.1111/echo.15516.
9. He B, Kwan AC, Cho JH, Yuan N, Pollick C, Shiota T, et al. Blinded, Randomized Trial of Sonographer Versus AI Cardiac Function Assessment. *Nature.* 2023;616(7957):520-4. doi: 10.1038/s41586-023-05947-3.
10. Papadopoulou SL, Sachpekidis V, Kantartzis V, Styliadis I, Nihoyannopoulos P. Clinical Validation of an Artificial Intelligence-Assisted Algorithm for Automated Quantification of Left Ventricular Ejection Fraction in Real Time by a Novel Handheld Ultrasound Device. *Eur Heart J Digit Health.* 2022;3(1):29-37. doi: 10.1093/ehjdh/ztac001.
11. Salte IM, Østvik A, Smistad E, Melichova D, Nguyen TM, Karlsen S, et al. Artificial Intelligence for Automatic Measurement of Left Ventricular Strain in Echocardiography. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2021;14(10):1918-28. doi: 10.1016/j.jcmg.2021.04.018.
12. Penso M, Ranalletta RA, Pepi M, Garlaschè A, Ali SG, Fusini L, et al. Comparison Between Automatic and Semiautomatic System for the 3D Echocardiographic Multiparametric Evaluation of RV Function and Dimension. *J Clin Med.* 2022;11(15):4528. doi: 10.3390/jcm11154528.
13. Asch FM, Mor-Avi V, Rubenson D, Goldstein S, Saric M, Mikati I, et al. Deep Learning-Based Automated Echocardiographic Quantification of Left Ventricular Ejection Fraction: A Point-of-Care Solution. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2021;14(6):e012293. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.120.012293.

14. Sveric KM, Botan R, Dindane Z, Winkler A, Nowack T, Heitmann C, et al. Single-Site Experience with an Automated Artificial Intelligence Application for Left Ventricular Ejection Fraction Measurement in Echocardiography. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13(7):1298. doi: 10.3390/diagnostics13071298.
15. Wang TKM, Cremer PC, Chan N, Piotrowska H, Woodward G, Jaber WA. Utility of an Automated Artificial Intelligence Echocardiography Software in Risk Stratification of Hospitalized COVID-19 Patients. *Life (Basel)*. 2022;12(9):1413. doi: 10.3390/life12091413.
16. Liel-Cohen N, Kobal S, Butnaru A, Alper-Suissa L, Feinstein S. A Novel Artificial Intelligence-Based System Provides Global Longitudinal Strain Automatically Behind the Scenes. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(1):i8-i9. doi: 10.1093/ehjci/jeab289.004.
17. Di Candia A, Castaldi B, Cati A, Basso A, Fumanelli J, Sabatino J, et al. AI do it Better. Reproducibility of Fully Automated Versus Manual Analysis of Left Ventricle Function Using a New Software. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(1):i252-i3. doi: 10.1093/ehjci/jeab289.183.
18. Popoff A, Langet H, Piro P, Ropert C, Allain P, Gauriau R, et al. Can we Improve the Accuracy and Reproducibility of Left Ventricular Ejection Fraction from 2D Echocardiography Using Artificial Intelligence? A Validation Against Cardiac Magnetic resonance. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2020;21(1):i34-i5. doi: 10.1093/ehjci/jez319.032.
19. Varudo R, Gonzalez FA, Leote J, Martins C, Bacariza J, Fernandes A, et al. Machine Learning for the Real-Time Assessment of Left Ventricular Ejection Fraction in Critically Ill Patients: A Bedside Evaluation by Novices and Experts in Echocardiography. *Crit Care*. 2022;26(1):386. doi: 10.1186/s13054-022-04269-6.
20. Burke D, Corrigan N, Herlihy M, Nasaj O, Dickson J, Delaney D, et al. Real World Evaluation of Artificial Intelligence Echocardiography Image Guidance and Acquisition with Novice Scanners in Multiple Clinical Settings. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(1):i20. doi: 10.1093/ehjci/jeab289.011.
21. Narang A, Bae R, Hong H, Thomas Y, Surette S, Cadieu C, et al. Utility of a Deep-Learning Algorithm to Guide Novices to Acquire Echocardiograms for Limited Diagnostic Use. *JAMA Cardiol*. 2021;6(6):624-32. doi: 10.1001/jamacardio.2021.0185.
22. Surette S, Narang A, Bae R, Hong H, Thomas Y, Cadieu C, et al. Artificial Intelligence-Guided Image Acquisition on Patients with Implanted Electrophysiological Devices: Results from a Pivotal Prospective Multi-Center Clinical Trial. *Eur Heart J*. 2020;41(2):6. doi: 10.1093/ehjci/ehaa946.0006.
23. Schneider M, Bartko P, Geller W, Dannenberg V, König A, Binder C, et al. A machine Learning Algorithm Supports Ultrasound-Naïve Novices in the Acquisition of Diagnostic Echocardiography Loops and Provides Accurate Estimation of LVEF. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2021;37(2):577-86. doi: 10.1007/s10554-020-02046-6.
24. Motazedian P, Marbach J, Prosperi-Porta C, Parlow S, Di Santo P, Jung R, et al. Point-of-Care Ultrasonography: Artificial Intelligence in the Assessment of Left Ventricular Function. *Circulation*. 2022;146(1):15710. doi: 10.1161/circ.146.suppl_1.15710Circulation.
25. Peck D, Rwebemba J, Nakagaayi D, Minja NW, Ollberding NJ, Pulle J, et al. The Use of Artificial Intelligence Guidance for Rheumatic Heart Disease Screening by Novices. *J Am Soc Echocardiogr*. 2023;36(7):724-32. doi: 10.1016/j.echo.2023.03.001.
26. Zhai S, Wang H, Sun L, Zhang B, Huo F, Qiu S, et al. Artificial Intelligence (AI) Versus Expert: A Comparison of Left Ventricular Outflow Tract Velocity Time Integral (LVOT-VTI) Assessment Between ICU Doctors and an AI Tool. *J Appl Clin Med Phys*. 2022;23(8):e13724. doi: 10.1002/acm2.13724.
27. Dadon Z, Butnaru A, Rosenmann D, Alper-Suissa L, Glikson M, Alpert EA. Use of Artificial Intelligence as a Didactic Tool to Improve Ejection Fraction Assessment in the Emergency Department: A Randomized Controlled Pilot Study. *AEM Educ Train*. 2022;6(2):e10738. doi: 10.1002/aet2.10738.
28. O'Driscoll JM, Hawkes W, Beqiri A, Mumith A, Parker A, Upton R, et al. Left Ventricular Assessment with Artificial Intelligence Increases the Diagnostic Accuracy of Stress Echocardiography. *Eur Heart J Open*. 2022;2(5):oeac059. doi: 10.1093/ehjopen/oeac059.
29. Kusunose K, Abe T, Haga A, Fukuda D, Yamada H, Harada M, et al. A Deep Learning Approach for Assessment of Regional Wall Motion Abnormality from Echocardiographic Images. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2020;13(2 Pt 1):374-81. doi: 10.1016/j.jcmg.2019.02.024.
30. Stowell C, Howard J, Demetrescu C, Bhattacharyya S, Mangion K, Vimalaesar K, et al. Fully Automated Global Longitudinal Strain Assessment Using Artificial Intelligence Developed and Validated by a UK-wide Echocardiography Expert Collaborative. *Eur Heart J*. 2021;42(1):2. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.120.011951.
31. Tromp J, Seekings PJ, Hung CL, Iversen MB, Frost MJ, Ouwerkerk W, et al. Automated Interpretation of Systolic and Diastolic Function on the Echocardiogram: A Multicohort Study. *Lancet Digit Health*. 2022;4(1):e46-e54. doi: 10.1016/S2589-7500(21)00235-1.
32. Asch FM, Poilvert N, Abraham T, Jankowski M, Cleve J, Adams M, et al. Automated Echocardiographic Quantification of Left Ventricular Ejection Fraction Without Volume Measurements Using a Machine Learning Algorithm Mimicking a Human Expert. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2019;12(9):e009303. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.119.009303.
33. Hanif W, Goldberg Y, Taub CC, Vorchheimer DA, Slipczuk L, Ho E, et al. Automated Measurement of Global Longitudinal Strain by Speckle-Tracking Echocardiography in Cardio-Oncology Patients Using Artificial Intelligence. *Circulation*. 2021;144(1):A11383. doi: 10.1161/circ.144.suppl_1.11383.
34. Fung A, Moulson N, Balthazaar S, Girgis H, van Woudenberg N, Abolmaesumi P, et al. Can Artificial Intelligence Assess Image Quality in Point-Of-Care Ultrasonography? *Canadian Journal of Cardiology*. 2019;35(10):146. doi: 10.1016/j.cjca.2019.07.566.
35. Kusunose K, Haga A, Abe T, Sata M. Utilization of Artificial Intelligence in Echocardiography. *Circ J*. 2019;83(8):1623-9. doi: 10.1253/circj.CJ-19-0420.
36. Asch FM, Descamps T, Sarwar R, Karagodin I, Singulane CC, Xie M, et al. Human Versus Artificial Intelligence-Based Echocardiographic Analysis as a Predictor of Outcomes: An Analysis from the World Alliance Societies of Echocardiography COVID Study. *J Am Soc Echocardiogr*. 2022;35(12):1226-37.e7. doi: 10.1016/j.echo.2022.07.004.

