

## Análise de Eletrocardiografia Aprimorada por Inteligência Artificial para o Diagnóstico da Doença de Chagas

*Artificial Intelligence-Enhanced Electrocardiography Analysis for Diagnosing Chagas Disease*

Isabella Moreira Gonzalez Fonseca,<sup>1,2</sup> Maria Carmo Pereira Nunes,<sup>1,2</sup> Craig Sable,<sup>3</sup> Renata Fonseca Mendoza,<sup>4</sup> Fred Luciano Neves Santos,<sup>5,6</sup> Paulo Rodrigues Gomes,<sup>2</sup> Adson Patrik Vieira Carvalho,<sup>1</sup> Bernardo Fonseca Mendoza,<sup>4</sup> Nilson Lazaro Souza,<sup>5</sup> José Augusto de Almeida Barbosa,<sup>1</sup> Clareci Silva Cardoso,<sup>7</sup> Bruno Ramos Nascimento,<sup>1,8,9</sup> Antonio L. P. Ribeiro<sup>1,2</sup>

Serviço de Cardiologia e Cirurgia Cardíaca, Hospital das Clínicas, Universidade Federal de Minas Gerais,<sup>1</sup> Belo Horizonte, MG – Brasil  
Centro de Telessaúde e Serviço de Cardiologia, Hospital das Clínicas, Universidade Federal de Minas Gerais,<sup>2</sup> Belo Horizonte, MG – Brasil  
Cardiovascular Outreach and Telemedicine Ochsner Children's Hospital,<sup>3</sup> New Orleans, LA – EUA  
Hospital da Criança de Feira de Santana,<sup>4</sup> Feira de Santana, BA – Brasil  
Oswaldo Cruz (Fiocruz),<sup>5</sup> Salvador, BA – Brasil  
Programa Translacional Integrado em Doença de Chagas (Fio-Chagas), Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz),<sup>6</sup> Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Laboratório Avançado de Saúde Pública, Instituto Gonçalo Moniz, Fundação Faculdade de Medicina, Universidade Federal de São João del-Rei,<sup>7</sup> Divinópolis, MG – Brasil  
Departamento de Clínica Médica, Faculdade de Medicina, Universidade Federal de Minas Gerais,<sup>8</sup> Belo Horizonte, MG – Brasil  
Serviço de Cardiologia Intervencionista, Hospital Madre Teresa,<sup>9</sup> Belo Horizonte, MG – Brasil

### Resumo

**Fundamento:** A doença de Chagas afeta milhões de pessoas em todo o mundo e permanece como uma das principais causas de cardiomiopatia na América Latina. O diagnóstico precoce ainda representa um desafio em regiões endêmicas. A análise de eletrocardiografia (ECG) aprimorada por inteligência artificial (IA) pode oferecer uma estratégia de baixo custo para rastreamento em larga escala em contextos com recursos limitados.

**Objetivos:** Avaliar o desempenho de um algoritmo de ECG aprimorada por IA combinado com dados clínicos para a detecção da doença de Chagas em um programa de rastreamento comunitário realizado em uma região altamente endêmica do Nordeste do Brasil.

**Métodos:** Em agosto de 2024, 1.115 adultos foram submetidos à aquisição padronizada de ECG de 12 derivações durante uma campanha de campo em Feira de Santana, Bahia, nordeste do Brasil. Um modelo de IA previamente treinado analisou os traçados de ECG e incorporou três variáveis clínicas: i) residência prévia em áreas infestadas por triatomíneos, ii) condições habitacionais precárias e iii) histórico familiar de doença de Chagas. Indivíduos identificados como positivos pela IA foram classificados como casos suspeitos. Casos suspeitos e controles pareados (2:1) foram submetidos a testes sorológicos no ponto de cuidado.

**Resultados:** O algoritmo identificou 121 indivíduos (10,9%), correspondendo a uma prevalência estimada de doença de Chagas baseada em IA de 7,8% (intervalo de confiança de 95% [IC95%]: 6,2-9,6). Entre os 112 indivíduos que completaram o teste sorológico, 13 apresentaram resultado positivo, todos pertencentes ao grupo suspeito positivo pela IA; nenhum caso soropositivo foi identificado entre os controles. A sensibilidade foi de 100% (IC95%: 69-100), a especificidade de 40% (IC95%: 30-50), o valor preditivo negativo de 100% (IC95%: 91-100) e o valor preditivo positivo de 12% (IC95%: 11-14), com uma razão de chances diagnóstica de 6,6.

**Conclusões:** Um algoritmo de ECG aprimorada por IA combinado com variáveis clínicas simples demonstrou excelente sensibilidade para a detecção da doença de Chagas e pode representar uma ferramenta valiosa de triagem em contextos endêmicos com recursos limitados.

**Palavras-chave:** Doença de Chagas; Inteligência Artificial; Eletrocardiografia; Programas de Rastreamento.

**Correspondência:** Isabella Moreira Gonzalez Fonseca •  
Rua Desembargador Drumond, 113. CEP 30210-030, Bairro Serra, Belo Horizonte, MG – Brasil  
E-mail: dubella@hotmail.com  
Artigo recebido em 14/02/2026, revisado em 13/04/2026, aceito em 15/03/2026  
Editor responsável pela revisão: Gláucia Maria Moraes de Oliveira

**DOI:** <https://doi.org/10.36660/abc.20260032>

## Abstract

**Background:** Chagas disease affects millions worldwide and remains a leading cause of cardiomyopathy in Latin America. Early diagnosis remains challenging in endemic regions. Artificial intelligence (AI)-based electrocardiography (ECG) analysis may offer a low-cost strategy for large-scale screening in resource-limited settings.

**Objectives:** To evaluate the performance of an AI-ECG algorithm combined with clinical data for detecting Chagas disease in a community-based screening program conducted in a highly endemic region in Northeastern Brazil.

**Methods:** In August 2024, 1,115 adults underwent standardized 12-lead ECG acquisition during a field campaign in Feira de Santana, Bahia, northeastern Brazil. A previously trained AI model analyzed ECG tracings and incorporated three clinical variables: i) prior residence in triatomine-infested areas, ii) poor housing conditions, and iii) family history of Chagas disease. Individuals flagged as AI-positive were classified as suspected cases. Suspected cases and matched controls (2:1) underwent point-of-care serological testing.

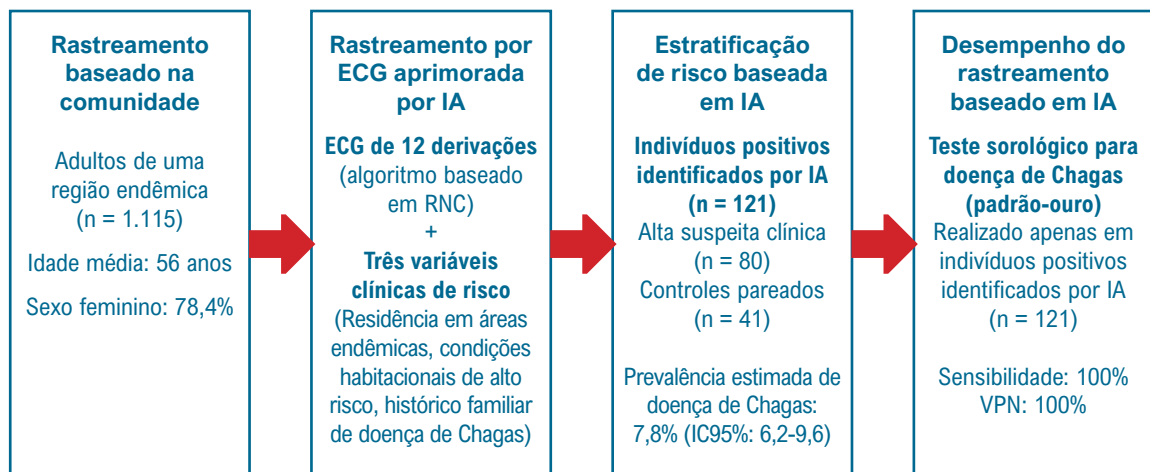
**Results:** The algorithm flagged 121 individuals (10.9%), corresponding to an estimated AI-based prevalence of Chagas disease of 7.8% (95%CI: 6.2-9.6). Among the 112 individuals who completed serological testing, 13 tested positive, all within the AI-positive suspected group; no seropositive cases were identified among controls. Sensitivity was 100% (95%CI: 69-100), specificity 40% (95%CI: 30-50), negative predictive value 100% (95%CI: 91-100), and positive predictive value 12% (95%CI: 11-14), with a diagnostic odds ratio of 6.6.

**Conclusions:** An AI-ECG algorithm combined with simple clinical variables demonstrated excellent sensitivity for the detection of Chagas disease and may represent a valuable triage tool in endemic, resource-constrained settings.

**Keywords:** Chagas Disease; Artificial Intelligence; Electrocardiography; Mass Screening.

Full texts in English - <https://abccardiol.org/en/>

**Figura Central:** Análise de Eletrocardiografia Aprimorada por Inteligência Artificial para o Diagnóstico da Doença de Chagas



Arq Bras Cardiol. 2026; 123(5):e20260032

IA: inteligência artificial; ECG: eletrocardiografia; RNC: rede neural convolucional; IC95%: intervalo de confiança de 95%; VPN: valor preditivo negativo.

## Introdução

A doença de Chagas, causada pelo protozoário parasita *Trypanosoma cruzi*, é uma das doenças tropicais negligenciadas mais prevalentes. Afeta aproximadamente 6-7 milhões de pessoas em todo o mundo, principalmente na América Latina.<sup>1-3</sup> Embora a transmissão por vetores (especialmente insetos triatomíneos) e por transfusão sanguínea tenha diminuído substancialmente nas últimas décadas, em decorrência de melhorias socioeconômicas,

melhores condições habitacionais e iniciativas de saúde pública, a cardiomiopatia chagásica crônica permanece como uma importante causa de morbidade e mortalidade. Trata-se da forma mais comum de acometimento orgânico, afetando mais de 30% dos indivíduos soropositivos; além disso, frequentemente evolui de forma silenciosa até estágios avançados.<sup>4</sup>

O padrão-ouro para o diagnóstico etiológico da doença de Chagas é o teste sorológico para anticorpos contra *T. cruzi*,

enquanto a ecocardiografia permanece como o principal método para a detecção de acometimento cardíaco avançado, particularmente disfunção ventricular, além de orientar a estratificação de risco e o prognóstico.<sup>1</sup> No entanto, o acesso a essas modalidades diagnósticas ainda é limitado em muitas regiões endêmicas com restrição de recursos.

Por outro lado, a eletrocardiografia (ECG) é uma ferramenta amplamente disponível, de baixo custo, capaz de identificar sinais precoces de acometimento cardíaco na cardiomiopatia chagásica crônica, incluindo bloqueio de ramo direito (BRD), bloqueio fascicular anterior esquerdo (BFAE), extrassístoles ventriculares e complexos QRS fragmentados, que são marcadores bem estabelecidos de envolvimento cardíaco na doença de Chagas.<sup>5</sup> Apesar de sua utilidade clínica e recomendação para avaliação anual, a interpretação convencional da ECG apresenta sensibilidade e especificidade limitadas, especialmente para a detecção de doença subclínica. Além disso, a ECG possui potencial para ser incorporada em estratégias de rastreamento populacional como ferramenta no ponto de cuidado para estimar a probabilidade de doença de Chagas, particularmente em contextos com poucos recursos, onde os métodos diagnósticos são escassos.

Nos últimos anos, modelos de *deep learning* baseados em inteligência artificial (IA) têm demonstrado elevado desempenho diagnóstico na interpretação de ECG. Destaca-se que estudos prévios demonstraram que ECGs aprimoradas por IA podem identificar soropositividade para *T. cruzi*<sup>6</sup> e prever disfunção sistólica do ventrículo esquerdo em indivíduos com cardiomiopatia chagásica crônica, com valores de área sob a curva (AUC, do inglês *area under the curve*) de até 0,84.<sup>7</sup> Esses achados reforçam o potencial dos algoritmos de ECG aprimorada por IA como ferramentas acessíveis e escaláveis para detecção precoce e estratificação de risco na doença de Chagas, mesmo antes do surgimento de alterações estruturais cardíacas evidentes.

Este estudo avaliou o desempenho diagnóstico de um algoritmo de ECG aprimorada por IA para a detecção de soropositividade para *T. cruzi* durante uma campanha de rastreamento baseada na comunidade em indivíduos sem suspeita clínica de doença de Chagas, com o objetivo de avaliar seu potencial como estratégia de triagem populacional de baixo custo em regiões endêmicas. Os principais achados estão resumidos na Figura Central.

## Métodos

### Desenho do estudo e população

Mediante solicitação razoável ao autor correspondente, os dados do estudo e os métodos analíticos poderão ser disponibilizados a outros pesquisadores com o objetivo de reproduzir os resultados ou replicar os procedimentos deste estudo. O modelo de ECG aprimorada por IA avaliado neste estudo é atualmente uma ferramenta de pesquisa proprietária e não foi disponibilizado publicamente; o acesso ao código ou à interface de implementação está sujeito a acordos institucionais, requisitos de governança de dados e futuras considerações regulatórias.

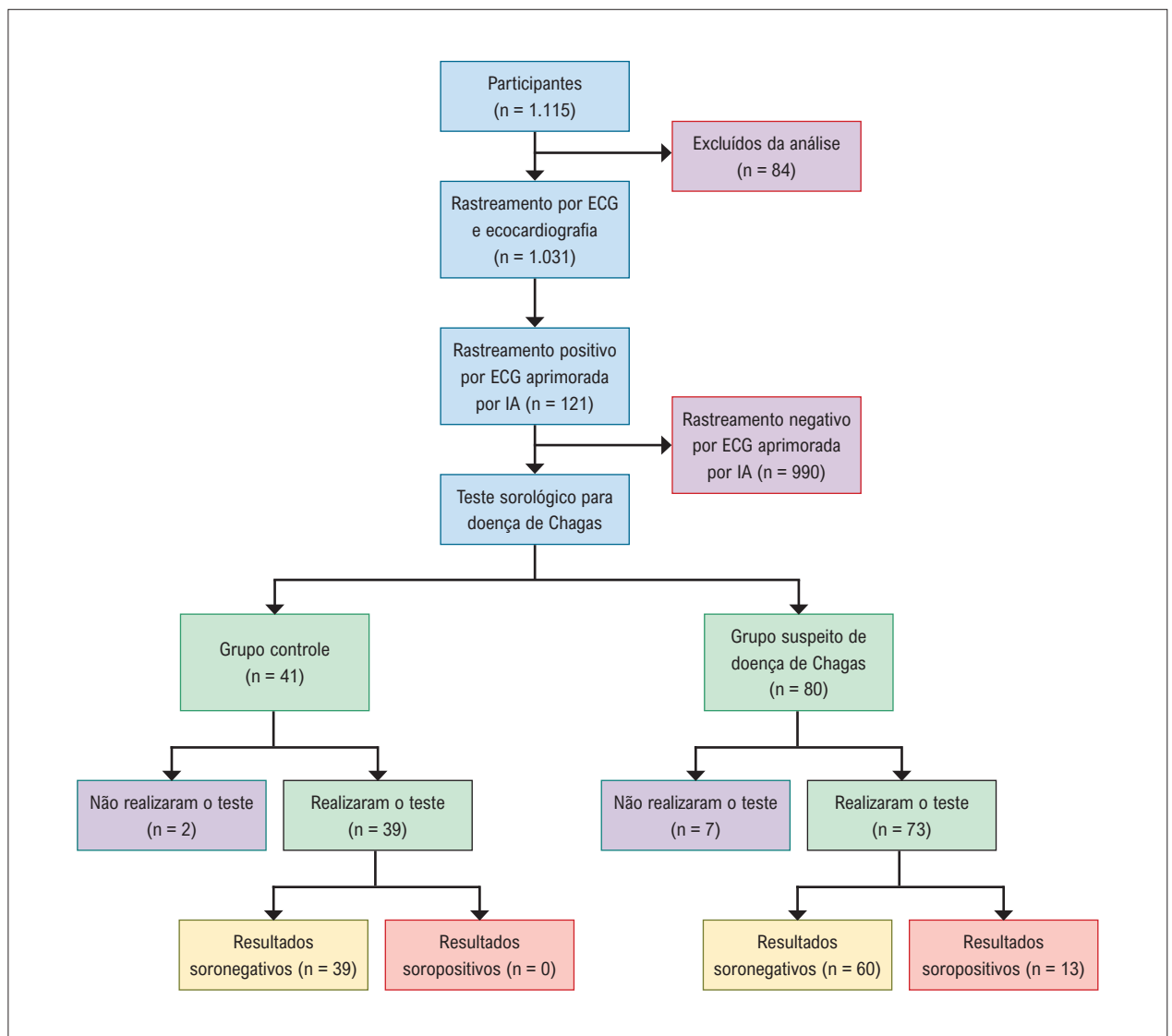
Trata-se de um estudo transversal de validação externa, no qual um algoritmo pré-existente, aprimorado por IA e baseado em pontuação, foi aplicado a participantes incluídos em uma campanha de saúde comunitária realizada em agosto de 2024 em uma região endêmica para doença de Chagas em Feira de Santana e regiões adjacentes da Bahia, Nordeste do Brasil. A estratégia de rastreamento cardiovascular fez parte de uma iniciativa multicêntrica denominada PROVAR+ (Programa de Rastreamento da Valvopatia Reumática), conduzida por meio de uma colaboração internacional entre o Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil, e o *Children's National Hospital*, Washington, DC, Estados Unidos. O protocolo do estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa local CAAE 37228120.9.0000.5149 e pelas autoridades de saúde regionais, em conformidade com os padrões éticos para pesquisas envolvendo seres humanos.

A coorte do estudo foi composta por adultos ( $\geq 18$  anos) recrutados por meio da rede de atenção primária, campanhas de saúde dedicadas e divulgação em mídias sociais, sem diagnóstico prévio ou suspeita clínica de doença de Chagas. Os participantes elegíveis foram identificados aleatoriamente pelas autoridades de saúde locais e submetidos a um protocolo padronizado de rastreamento, que incluiu um breve questionário clínico, uma ECG de 12 derivações e ecocardiografia transtorácica portátil, independentemente da presença de sintomas ou de indicação prévia para avaliação cardiovascular. Indivíduos com histórico conhecido de doença de Chagas foram excluídos. Todos os participantes forneceram consentimento informado por escrito antes de quaisquer procedimentos relacionados ao estudo. Um fluxograma detalhado da população do estudo e das exclusões é apresentado na Figura 1.

### Aquisição de eletrocardiografia e algoritmo de inteligência artificial

Todos os participantes foram submetidos a uma ECG de 12 derivações em repouso, adquirida por meio de dispositivos comercialmente disponíveis e transmitida ao Centro de Telessaúde da UFMG. As ECGs foram inicialmente interpretadas por um sistema automatizado desenvolvido por uma instituição acadêmica externa (versão 28.5, janeiro de 2014), que gerava relatórios clínicos em tempo real.

Adicionalmente, para padronização do estudo, todos os traçados de ECG foram posteriormente revisados por um cardiologista treinado e classificados de acordo com o Código de Minnesota.<sup>8</sup> O Código de Minnesota é o sistema de classificação de ECG mais amplamente utilizado no mundo, desenvolvido na década de 1950 pelo Dr. Henry Blackburn, e baseia-se em critérios de mensuração predefinidos para atribuir códigos numéricos específicos conforme a gravidade dos achados.<sup>9</sup> Em casos de discrepância entre os relatórios automatizados e a interpretação do cardiologista, os exames foram submetidos a adjudicação para definição da classificação final. Embora versões modificadas do Código de Minnesota, adaptadas para a doença de Chagas, tenham sido amplamente utilizadas em coortes específicas da doença, a codificação de ECG neste estudo foi empregada exclusivamente para padronização descritiva e não foi utilizada como *input* para o modelo de IA nem como padrão de referência para o diagnóstico da doença de Chagas.



**Figura 1** – Fluxograma do delineamento do estudo. ECG: eletrocardiografia; IA: inteligência artificial.

Antes da aquisição da ECG, foi realizada uma entrevista estruturada breve para coleta de dados demográficos, indicações clínicas para o exame e fatores de risco para doença de Chagas. Com base nesses dados, foi aplicado um algoritmo aprimorado por IA, integrando sinais de ECG com três variáveis clínicas derivadas de diretrizes nacionais para doença de Chagas:<sup>10</sup> i) histórico de residência em áreas com presença do vetor triatomíneo; ii) residência em condições habitacionais associadas à exposição ao vetor; e iii) histórico familiar de doença de Chagas confirmada. Os participantes identificados pelo algoritmo combinado foram classificados como positivos pela IA para fins de rastreamento.

O algoritmo proprietário de ECG aprimorada por IA para doença de Chagas foi originalmente desenvolvido a partir de dois grandes conjuntos de dados SaMi-Trop e CODE, derivados de uma população heterogênea, incluindo indivíduos com doença de Chagas e um grupo menor de

controles saudáveis. Um dos conjuntos de dados consistiu em um estudo de coorte conduzido em uma região de alta endemicidade SaMi-Trop, enquanto o outro foi composto por um grande banco de dados de tele-ECG coletado de uma população ampla em toda a América Latina (CODE).

O algoritmo foi previamente validado em dois conjuntos de dados independentes REDS-II e ELSA-Brasil, incluindo indivíduos com diferentes perfis sorológicos e uma coorte longitudinal de adultos.<sup>6,7</sup>

O modelo de *deep learning* foi baseado em uma arquitetura de rede residual adaptada para sinais unidimensionais. Incluiu camadas convolucionais tanto antes quanto dentro de blocos residuais, em conformidade com arquiteturas previamente utilizadas para classificar múltiplas anormalidades na ECG, com modificação da camada de saída final para gerar uma classificação binária para doença de Chagas. Os parâmetros do modelo foram

## Artigo Original

otimizados por meio da minimização da função de perda de entropia cruzada binária, com os dados processados em lotes de tamanho 32.

As estratégias de regularização incluíram uma taxa de *dropout* de 0,5 e *weight decay* de 0,001. Uma abordagem de *ensemble* foi implementada por meio do treinamento do modelo 15 vezes com diferentes sementes aleatórias, sendo as predições finais obtidas pela média das saídas. Os valores resultantes variaram de 0 a 1 e podem ser interpretados como a probabilidade predita de doença de Chagas com base no teste sorológico de referência.<sup>6</sup>

A probabilidade predita foi posteriormente integrada às variáveis clínicas e demográficas mencionadas para gerar uma probabilidade final baseada em pontuação para doença de Chagas, independente de anormalidades convencionais na ECG ou de achados ecocardiográficos.

### Estratégia de verificação sorológica em duas etapas

Como o teste sorológico não foi realizado em toda a população rastreada, foi implementado um delineamento de verificação em duas etapas. Todos os participantes classificados como positivos pela IA foram convidados para confirmação sorológica, enquanto os participantes negativos pela IA foram selecionados como controles pareados por meio de amostragem pareada por idade e sexo em uma razão de 2:1. Os controles foram selecionados aleatoriamente utilizando um *software* proprietário de acionamento baseado em números aleatórios gerados por computador.

O teste sorológico foi realizado por meio de um teste diagnóstico rápido no ponto de cuidado, baseado em antígenos quiméricos IBMP, desenvolvido para detectar anticorpos contra *T. cruzi*. Esse ensaio demonstrou alta sensibilidade e especificidade e foi considerado o padrão de referência diagnóstico neste estudo.<sup>11</sup> Essa estratégia de amostragem foi adotada para garantir a viabilidade em uma campanha de rastreamento em campo.

### Ecocardiografia

Um protocolo ecocardiográfico simplificado, baseado nas recomendações da American Society of Echocardiography,<sup>12</sup> foi realizado por médicos utilizando sistemas portáteis de ultrassom no mesmo dia da avaliação clínica e da triagem por ECG. No entanto, os achados ecocardiográficos não estavam disponíveis no momento da classificação baseada em IA e não foram utilizados no desenvolvimento do algoritmo nem na tomada de decisão no ponto de cuidado. Esses dados foram utilizados exclusivamente para análises adicionais *post hoc*.

As anormalidades estruturais cardíacas foram definidas de acordo com critérios predefinidos descritos em estudos prévios PROVAR+ e nos estudos ASE-REWARD.<sup>10,13</sup> Essas anormalidades incluíram doença valvar moderada a grave (regurgitação ou estenose), disfunção ou hipertrofia ventricular, cardiopatia congênita, derrame pericárdico e alterações segmentares da motilidade da parede. Foram registradas tanto medidas objetivas quanto avaliações qualitativas. Apenas participantes com anormalidades

clínicamente significativas foram encaminhados para atendimento especializado.

### Análise estatística

Devido à natureza descritiva da análise, todos os cálculos foram realizados utilizando o Microsoft Excel 2019 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, EUA). Como se trata de um estudo exploratório, não foi realizado cálculo prévio do tamanho amostral; em vez disso, foi analisado o número total de participantes incluídos durante o período de rastreamento de 4 dias.

As variáveis contínuas são apresentadas como média  $\pm$  desvio padrão ou mediana e intervalo interquartil, conforme apropriado, com base na distribuição avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk. As variáveis categóricas são apresentadas como frequências absolutas e percentuais. As características basais dos participantes classificados como positivos e negativos pela IA foram descritas de forma descritiva.

Quando aplicável, as comparações entre grupos foram realizadas utilizando o teste *t* de Student não pareado ou o teste *U* de Mann-Whitney para variáveis contínuas, e o teste do qui-quadrado ou o teste exato de Fisher para variáveis categóricas, conforme apropriado. Um valor de  $p < 0,05$  foi considerado estatisticamente significativo.

As métricas de desempenho diagnóstico do algoritmo de IA, incluindo sensibilidade, especificidade, valor preditivo positivo (VPP), valor preditivo negativo (VPN) e *odds ratio* diagnóstica (ORD), foram calculadas utilizando a soropositividade no ponto de cuidado como padrão de referência. Intervalos de confiança de 95% (IC95%) foram calculados para todas as estimativas.

Como o teste sorológico não foi realizado em todos os participantes rastreados, tendo sido adotada uma estratégia de verificação em duas etapas, as medidas de desempenho diagnóstico devem ser interpretadas como estimativas exploratórias dentro da amostra testada. Um fluxograma detalhado descrevendo o delineamento do estudo e a seleção dos participantes é apresentado na Figura 1.

## Resultados

Ao todo, 1.115 indivíduos foram submetidos a rastreamento durante a campanha de saúde. Desses, 1.031 (92,5%) completaram com sucesso o protocolo de ECG de 12 derivações. A idade média dos participantes foi de 56 anos, e a maioria era do sexo feminino (78,4%). De acordo com a classificação do Código de Minnesota, 402 indivíduos (39,0%) apresentaram anormalidades na ECG, incluindo 284 (27,5%) com alterações menores e 118 (11,4%) com anormalidades maiores.

O algoritmo de ECG aprimorada por IA gerou 121 alertas para realização de teste sorológico no ponto de cuidado. Desses, 80 corresponderam a indivíduos classificados como suspeitos de doença de Chagas e 41 a participantes inicialmente não considerados de alto risco. Após a exclusão de nove indivíduos que não realizaram o teste devido à perda de seguimento ou limitações logísticas, 112 participantes completaram a avaliação sorológica. Esses

incluiram 73 indivíduos do grupo suspeito de doença de Chagas e 39 do grupo sem alto risco inicial. As características basais detalhadas são apresentadas na Tabela 1.

Dos 112 indivíduos testados, 13 (todos do grupo suspeito de doença de Chagas) apresentaram sorologia positiva, confirmando o diagnóstico de doença de Chagas. Nenhum caso soropositivo foi identificado entre os participantes inicialmente não considerados de alto risco. Esses achados resultaram em sensibilidade de 100% (IC95%: 69-100), especificidade de 40% (IC95%: 30-50), VPN de 100% (IC95%: 91-100) e VPP de 12% (IC95%: 11-14), com uma ORD de 6,6 para o algoritmo combinado baseado em IA.

Entre os 99 participantes classificados como positivos por IA, mas com sorologia negativa, 46 (46,4%) apresentaram anormalidades no ECG, incluindo 13 com anormalidades maiores e 33 com alterações menores.

No subgrupo de 13 indivíduos que foram simultaneamente positivos pela IA e soropositivos, os achados no ECG demonstraram que cinco apresentavam anormalidades maiores (quatro com BRD associado a BFAE e um com BRD isolado), enquanto dois apresentavam anormalidades menores e seis apresentavam ECG normal.

Embora a ecocardiografia não tenha sido incorporada ao algoritmo nem utilizada para classificação diagnóstica, dados ecocardiográficos estavam disponíveis para análise exploratória nesse subgrupo. Sete participantes apresentaram ecocardiogramas normais, três apresentaram achados leves (incluindo regurgitação tricúspide isolada ou dilatação do ventrículo direito) e três apresentaram anormalidades valvares moderadas, incluindo dois com regurgitação mitral e um com regurgitação mitral e tricúspide combinadas, sugestivas de padrão reumático. Nenhum dos

indivíduos soropositivos apresentou evidência de disfunção sistólica do ventrículo esquerdo.

## Discussão

O presente estudo demonstra que a integração de um algoritmo de ECG aprimorada por IA com variáveis clínicas simples pode identificar com acurácia casos soropositivos de doença de Chagas em uma campanha de rastreamento em comunidade envolvendo uma população não selecionada com alto risco sociodemográfico. O algoritmo combinado apresentou uma ORD de 6,6, com sensibilidade e VPN de 100%, sustentando seu potencial como ferramenta de exclusão diagnóstica em contextos com recursos limitados. Esses achados indicam forte aplicabilidade como estratégia de triagem, particularmente em cenários nos quais é necessária a priorização de testes confirmatórios. A capacidade do algoritmo de identificar todos os indivíduos soropositivos, mesmo na ausência de doença estrutural cardíaca evidente, reforça seu valor clínico em regiões endêmicas com acesso limitado a recursos diagnósticos especializados. Embora a especificidade tenha permanecido modesta (40%), esse *trade-off* pode ser aceitável em estratégias de rastreamento inicial nas quais a minimização de resultados falso-negativos é prioritária. Esses achados são particularmente relevantes no contexto de doenças tropicais negligenciadas, nas quais o subdiagnóstico é frequente e a detecção precoce pode reduzir a progressão da doença.

A ECG permanece como a ferramenta diagnóstica cardiovascular mais acessível em ambientes com poucos recursos e tem sido amplamente utilizado na avaliação da doença de Chagas, como componente central da avaliação clínica de rotina para identificação de acometimento cardíaco. Anormalidades clássicas (p.ex., BRD, BFAE e

**Tabela 1 – Características basais da população do estudo**

| Característica                                     | Total<br>(n = 1.031) | ECG aprimorada<br>por IA –<br>resultado positivo<br>(n = 121) | ECG aprimorada<br>por IA –<br>resultado negativo<br>(n = 910) | Valor<br>de p |
|----------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------|
| Idade, média (DP), anos                            | 56,1 (± 11,2)        | 57,4 (± 10,2)                                                 | 55,9 (± 11,3)                                                 | 0,17          |
| Mulheres, n (%)                                    | 808 (78,4%)          | 95 (78,5%)                                                    | 713 (78,3%)                                                   | 0,96          |
| ECG com qualquer anormalidade, n (%)               | 402 (39,0%)          | 48 (39,7%)                                                    | 354 (38,9%)                                                   | 0,87          |
| Anormalidade menor, n (%)                          | 284 (27,5%)          | 31 (25,6%)                                                    | 253 (27,8%)                                                   | 0,61          |
| Anormalidade maior, n (%)                          | 118 (11,4%)          | 17 (14,0%)                                                    | 101 (11,1%)                                                   | 0,35          |
| Doença de Chagas confirmada sorologicamente, n (%) | 13 (1,2%)            | 13 (10,7%)                                                    | 0 (0,0%)                                                      | < 0,001*      |
| Ecocardiografia realizada, n (%)                   | 1,031 (100%)         | 121 (100%)                                                    | 910 (100%)                                                    | N/A           |
| Anormalidade maior, n (%)                          | 262 (25,4%)          | 20 (16,5%)                                                    | 242 (26,5%)                                                   | 0,02*         |
| Envolvimento de VE ou VD, n (%)                    | 42 (4,0%)            | 2 (1,7%)                                                      | 40 (4,4%)                                                     | 0,16          |
| Ecocardiografia normal, n (%)                      | 455 (44,1%)          | 44 (36,3%)                                                    | 411 (45,1%)                                                   | 0,07          |

\* $p < 0.05$ . DP: desvio padrão; ECG: eletrocardiografia; IA: inteligência artificial; N/A: não aplicável; VE: ventrículo esquerdo; VD: ventrículo direito.

extrassístoles ventriculares) são marcadores bem estabelecidos de gravidade e progressão da doença,<sup>14</sup> correlacionando-se com envolvimento ventricular, risco de arritmias ventriculares malignas e mortalidade.<sup>15</sup> No entanto, evidências indicam que uma ECG normal, particularmente com complexo QRS estreito, não exclui acometimento cardíaco precoce na doença de Chagas.<sup>16</sup> Essas observações sustentam o uso de abordagens computacionais avançadas, como IA, que podem detectar padrões elétricos subclínicos não identificáveis por meio da interpretação visual convencional.

Modelos recentes de *deep learning* têm demonstrado resultados promissores na detecção de alterações relacionadas à doença de Chagas a partir de dados de ECG. Jidling et al. treinaram uma rede neural utilizando conjuntos de dados previamente publicados pelas coortes CODE e SaMi-Trop para identificar soropositividade para *T. cruzi*, alcançando uma AUC de 0,80 na validação interna e 0,68 na validação externa.<sup>6</sup> De forma semelhante, estudos prévios demonstraram que a análise de ECG aprimorada por IA pode prever disfunção sistólica do ventrículo esquerdo na doença de Chagas, com valores de AUC que podem chegar a 0,84.<sup>7</sup> O presente estudo amplia esses achados ao aplicar essa abordagem em um cenário prospectivo, real, em comunidade, envolvendo indivíduos sem suspeita clínica prévia de doença de Chagas.

Um aspecto metodológico importante deste estudo é a integração da ECG aprimorada por IA com variáveis clínicas direcionadas, o que é consistente com evidências de que os dados de ECG isoladamente podem ser insuficientes para a detecção em estágios iniciais. Além disso, uma proporção substancial de indivíduos classificados como positivos por IA, mas com sorologia negativa, apresentou anormalidades na ECG, o que sugere a presença de condições cardiovasculares precoces ou alternativas detectáveis por meio do rastreamento eletrocardiográfico. Esse achado requer investigação adicional, particularmente quanto às suas implicações prognósticas.

Destaca-se que um subgrupo de indivíduos neste estudo apresentou ECG convencional normal, mas foi classificado como positivo por IA e apresentou soropositividade confirmada. Essa observação sugere que a análise de ECG aprimorada por IA pode detectar padrões elétricos sutis além dos limites da interpretação visual especializada, possivelmente refletindo envolvimento miocárdico muito precoce. Esse conceito é sustentado por estudos prévios utilizando o escore de QRS de Selvester, que demonstraram que a fibrose miocárdica, identificada por ressonância magnética cardíaca, pode estar presente mesmo na ausência de anormalidades evidentes na ECG.<sup>17,18</sup> Esses achados reforçam o potencial papel da análise avançada de ECG, incluindo abordagens aprimoradas por IA, na detecção precoce de acometimento cardíaco na doença de Chagas.

As variáveis clínicas incorporadas ao algoritmo (i.e., residência em áreas endêmicas, condições habitacionais associadas à infestação por triatomíneos e histórico familiar de doença de Chagas) foram selecionadas com base em diretrizes clínicas nacionais.<sup>10</sup> Esses fatores provavelmente aumentaram o rendimento diagnóstico ao capturar determinantes sociodemográficos-chave da doença. O modelo de ECG aprimorada por IA foi originalmente

treinado em uma população geral, e não exclusivamente em indivíduos com doença de Chagas, destacando a importância da adaptação contextual quando aplicado a populações de alto risco.<sup>6</sup> A integração de variáveis ambientais e epidemiológicas aumentou seu desempenho nesse cenário. No entanto, estudos prospectivos multicêntricos de validação e implementação são necessários antes da adoção clínica mais ampla dessa estratégia de triagem.

Por fim, a distribuição dos casos soropositivos observada nesta amostra baseada na comunidade é consistente com padrões epidemiológicos previamente descritos em populações de alto risco na América Latina, particularmente em contextos rurais e semiurbanos característicos de regiões endêmicas do Nordeste brasileiro. Por exemplo, Cucunubá et al. relataram maiores taxas de soropositividade entre adultos mais velhos em áreas rurais endêmicas.<sup>4</sup> Embora o presente estudo não tenha sido desenhado para estimar a prevalência da doença, a identificação de casos confirmados reforça a necessidade de estratégias de rastreamento escaláveis e acessíveis em populações vulneráveis, bem como de adequada priorização de recursos diagnósticos e terapêuticos.

### Limitações do estudo

Este estudo apresenta algumas limitações. Em primeiro lugar, o delineamento transversal e o uso de um modelo de inteligência artificial previamente treinado em conjuntos de dados de população geral podem limitar a generalização para outros contextos endêmicos ou clínicos e para subpopulações específicas de alto risco.

Em segundo lugar, embora o algoritmo de ECG aprimorada por IA tenha demonstrado excelente sensibilidade, o valor observado de 100% deve ser interpretado com cautela, considerando o número limitado de indivíduos submetidos à testagem sorológica, particularmente entre aqueles classificados como negativos por IA. Em amostras pequenas, estimativas de sensibilidade perfeita são suscetíveis à superestimação, especialmente quando nenhum caso soropositivo é identificado por IA no grupo negativo.

Além disso, o número relativamente pequeno de indivíduos negativos pela IA que foram submetidos à testagem sorológica, selecionados por meio de amostragem pareada por idade e sexo, pode ter introduzido viés de seleção e reduzido o poder estatístico para detectar casos falso-negativos. Essa limitação também afeta a precisão das estimativas de especificidade e VPP, aumentando a incerteza em torno das métricas de desempenho diagnóstico observadas.

Adicionalmente, o uso de verificação sorológica seletiva pode ter introduzido viés de verificação parcial. Como resultado, as métricas diagnósticas reportadas podem não refletir integralmente o desempenho da estratégia de rastreamento em toda a população do estudo. Estudos adicionais são necessários para validar o modelo em coortes mais amplas e representativas.

Além disso, embora a inclusão de variáveis clínicas básicas provavelmente tenha contribuído para a melhora do desempenho do modelo, fatores de confusão não mensurados podem ter influenciado os resultados. Por fim, as variáveis clínicas selecionadas refletem fatores de risco

tradicionais associados à transmissão vetorial. Em regiões com dinâmicas de transmissão distintas, como a bacia amazônica, onde a transmissão oral predomina, o modelo pode não captar adequadamente o risco de infecção e pode requerer adaptação aos contextos epidemiológicos locais.

Estudos prospectivos futuros, envolvendo populações maiores e mais diversas, bem como acompanhamento abrangente incluindo correlação ecocardiográfica, são necessários para validar e calibrar adicionalmente o algoritmo.

## Conclusão

Este estudo evidencia a alta sensibilidade e a viabilidade operacional de uma abordagem baseada em ECG aprimorada por IA para a detecção de soropositividade para *T. cruzi* em contextos com poucos recursos. Ao integrar variáveis clínicas com uma rede neural treinada em dados de ECG em larga escala provenientes de uma das maiores redes de telemedicina da América Latina, essa estratégia representa uma solução promissora e escalável para detecção precoce e triagem no contexto de doenças negligenciadas. Pesquisas futuras devem concentrar-se na melhoria da especificidade e na avaliação da integração dessa abordagem em estratégias mais amplas dos sistemas de saúde para o controle da doença de Chagas.

## Contribuição dos Autores

Concepção e desenho da pesquisa: Fonseca IMG, Nunes MCP, Sable C, Nascimento BR, Ribeiro ALP; Obtenção de dados: Fonseca IMG, Nunes MCP, Mendonza RF, Santos FLN, Gomes PR, Carvalho APV, Mendonza BF, Souza NL, Barbosa JAA; Análise e interpretação dos dados: Fonseca IMG, Nunes MCP, Cardoso CS, Nascimento BR, Ribeiro ALP; Análise estatística: Nunes MCP, Nascimento BR, Ribeiro ALP; Obtenção de financiamento: Fonseca IMG, Sable C, Santos FLN; Redação do manuscrito: Fonseca IMG, Nunes MCP; Revisão crítica do manuscrito quanto ao conteúdo intelectual importante: Fonseca IMG, Nunes MCP, Sable C, Mendonza RF, Cardoso CS, Nascimento BR, Ribeiro ALP.

## Referências

1. Marin-Neto JA, Rassi A Jr, Oliveira GMM, Correia LCL, Ramos NA Jr, Luquetti AO, et al. SBC Guideline on the Diagnosis and Treatment of Patients with Cardiomyopathy of Chagas Disease - 2023. *Arq Bras Cardiol.* 2023;120(6):e20230269. doi: 10.36660/abc.20230269.
2. Andrade GN, Bosch-Nicolau P, Nascimento BR, Martins-Melo FR, Perel P, Geissbühler Y, et al. Prevalence of Chagas Disease among Latin American Immigrants in Non-Endemic Countries: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis. *Lancet Reg Health Eur.* 2024;46:101040. doi: 10.1016/j.lanepe.2024.101040.
3. GBD 2023 Chagas Disease and RAISE Study Collaborators. Global, Regional, and National Burden of Chagas Disease, 1990-2023: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2023. *Lancet Infect Dis.* 2026;26(3):284-301. doi: 10.1016/S1473-3099(25)00562-6.
4. Cucunubá ZM, Gutiérrez-Romero SA, Ramírez JD, Velásquez-Ortiz N, Ceccarelli S, Parra-Henao G, et al. The Epidemiology of Chagas Disease in the Americas. *Lancet Reg Health Am.* 2024;37:100881. doi: 10.1016/j.lana.2024.100881.
5. Nascimento BR, Araújo CG, Rocha MO, Domingues JD, Rodrigues AB, Barros MV, et al. The Prognostic Significance of Electrocardiographic Changes in Chagas Disease. *J Electrocardiol.* 2012;45(1):43-8. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2011.04.011.
6. Jidling C, Gedon D, Schön TB, Oliveira CDL, Cardoso CS, Ferreira AM, et al. Screening for Chagas Disease from the Electrocardiogram Using a Deep Neural Network. *PLoS Negl Trop Dis.* 2023;17(7):e0011118. doi: 10.1371/journal.pntd.0011118.
7. Brito BOF, Attia ZI, Martins LNA, Perel P, Nunes MCP, Sabino EC, et al. Left Ventricular Systolic Dysfunction Predicted by Artificial Intelligence Using the Electrocardiogram in Chagas Disease Patients-The SaMi-Trop Cohort. *PLoS Negl Trop Dis.* 2021;15(12):e0009974. doi: 10.1371/journal.pntd.0009974.
8. Prineas RJ, Crow RS, Zhang ZM. The MINNESOTA Code Manual of Electrocardiographic Findings. London: Springer; 2010. doi:10.1007/978-1-84882-778-3.

## Potencial Conflito de Interesse

Declaro não haver conflito de interesses pertinentes.

## Fontes de Financiamento

O presente estudo foi parcialmente financiado por Edwards Lifesciences Foundation, Every HEartbeat Matters Program 2025, CNPq grants 465518/2014-1, 310790/2021-2, 409604/2022-4, 445011/2023-8 e 310749/2022-0, e FAPEMIG grants RED 00192-23 e APQ-03291-18.

## Vinculação Acadêmica

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

## Aprovação Ética e Consentimento Informado

Este estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade Federal de Minas Gerais sob o número de protocolo CAAE 37228120.9.0000.5149. Todos os procedimentos envolvidos nesse estudo estão de acordo com a Declaração de Helsinki de 1975, atualizada em 2013. O consentimento informado foi obtido de todos os participantes incluídos no estudo.

## Uso de Inteligência Artificial

Durante a preparação deste trabalho, o(s) autor(es) usaram ChatGPT para aprimorar a gramática, esclarecer a linguagem e organizar o manuscrito. Após o uso desta ferramenta/serviço, o(s) autor(es) revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

## Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo está disponível mediante solicitação ao autor correspondente.

9. Ribeiro AL, Marcolino MS, Prineas RJ, Lima-Costa ME. Electrocardiographic Abnormalities in Elderly Chagas Disease Patients: 10-Year Follow-Up of the Bambuí Cohort Study of Aging. *J Am Heart Assoc.* 2014;3(1):e000632. doi: 10.1161/JAHA.113.000632.
10. Brasil. Ministério da Saúde. Protocolo Clínico e Diretrizes Terapêuticas Doença de Chagas. Brasília: Ministério da Saúde; 2023.
11. Santos FLN, Campos ACP, Amorim LDAF, Silva ED, Zanchin NIT, Celedon PAF, et al. Highly Accurate Chimeric Proteins for the Serological Diagnosis of Chronic Chagas Disease: A Latent Class Analysis. *Am J Trop Med Hyg.* 2018;99(5):1174-9. doi: 10.4269/ajtmh.17-0727.
12. Mitchell C, Rahko PS, Blauwet LA, Canaday B, Finstuen JA, Foster MC, et al. Guidelines for Performing a Comprehensive Transthoracic Echocardiographic Examination in Adults: Recommendations from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2019;32(1):1-64. doi: 10.1016/j.echo.2018.06.004.
13. Singh S, Bansal M, Maheshwari P, Adams D, Sengupta SP, Price R, et al. American Society of Echocardiography: Remote Echocardiography with Web-Based Assessments for Referrals at a Distance (ASE-REWARD) Study. *J Am Soc Echocardiogr.* 2013;26(3):221-33. doi: 10.1016/j.echo.2012.12.012.
14. Brito BOF, Ribeiro ALP. Electrocardiogram in Chagas Disease. *Rev Soc Bras Med Trop.* 2018;51(5):570-7. doi: 10.1590/0037-8682-0184-2018.
15. Rassi A Jr, Rassi A, Little WC, Xavier SS, Rassi SG, Rassi AC, et al. Development and Validation of a Risk Score for Predicting Death in Chagas' Heart Disease. *N Engl J Med.* 2006;355(8):799-808. doi: 10.1056/NEJMoa053241.
16. Ribeiro AL, Rocha MO, Barros MV, Rodrigues AR, Machado FS. A Narrow QRS does Not Predict a Normal Left Ventricular Function in Chagas' Disease. *Pacing Clin Electrophysiol.* 2000;23(11 Pt 2):2014-7. doi: 10.1111/j.1540-8159.2000.tb07076.x.
17. Couceiro KN, Ortiz JV, Correia MN, Silva e Silva MRH, Brandão AR, Silva PRL, et al. The Selvester QRS Score as an Estimative of Myocardial Injury in Acute Chagasic Patients from the Brazilian Amazon. *BMC Infect Dis.* 2021;21(1):396. doi: 10.1186/s12879-021-06083-x.
18. Sivri F, Icen YK, Koca H, Coşkun M, Arding M, Deniz O, et al. Selvester QRS Score is a Predictor of Mortality in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *Arq Bras Cardiol.* 2023;120(9):e20230235. doi: 10.36660/abc.20230235.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da licença de atribuição pelo Creative Commons