Revista Eletrônica ACERVO CIENTÍFICO
ISSN 2595-7899

Endemicidade e heterogeneidade espacial da tuberculose na Amazônia legal

Endemicity and spatial heterogeneity of tuberculosis in the Brazilian Amazon

Endemicidad y heterogeneidade espacial de la tuberculosis en la Amazonía brasileña

Denis Vieira Gomes Ferreira[1], Amanda Caroline Duarte Ferreira[1], Osvaldo Correia Damaceno[1], Alcinês da Silva Sousa Jr[2], José Antônio Herrera[1], Marília Brasil Xavier[2].

RESUMO

Objetivo: Estabelecer níveis de endemicidade da tuberculose na Amazônia Legal e identificar municípios relevantes na manutenção da doença. **Métodos:** Trata-se de um estudo ecológico e analítico, com dados de notificação de casos novos de tuberculose do período de 2009 a 2024, dos municípios da Amazônia Legal. Dados de notificação da doença e demográficos foram obtidos do Sistema de Informação de Agravos de Notificação e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Calculou-se as taxas de incidência, identificados e removidos os *outliers* (incidência > 69,11/100 mil hab.), foi aplicado o algoritmo de aprendizado não supervisionado *k-means* para clusterização. Procedeu-se a validação dos agrupamentos pelos índices de Silhouette (IS) e Davies-Bouldin (IDB). **Resultados:** Foram identificados cinco níveis de endemicidade: baixo (< 13,60), médio (13,6 a 22,91), alto (22,91 a 33,70), muito alto (33,70 a 48,79) e hiperendêmico (> 48,79/100 mil hab.). A validação demonstrou grupos bem definidos (IDB de 0,59 e IS majoritariamente acima de 0,50). Sete das nove capitais estão entre os municípios hiperendêmicos e mais 232 municípios foram classificados nos níveis Muito Alto e Hiperendêmico. **Conclusão:** A classificação proposta oferece uma ferramenta robusta para a vigilância epidemiológica e planejamento em saúde pública. Excelente instrumento na identificação dos municípios mais vulneráveis.

Palavras-chave: Tuberculose, Endemia, Indicadores de saúde.

ABSTRACT

Objective: To establish tuberculosis endemicity levels in the Brazilian Amazon and identify municipalities relevant to sustaining disease transmission. **Methods:** This was an ecological and analytical study using data on newly reported tuberculosis cases from 2009 to 2024 in municipalities within the Brazilian Amazon. Tuberculosis notification and demographic data were obtained from the Notifiable Diseases Information System and the Brazilian Institute of Geography and Statistics. Incidence rates were calculated, outliers were identified and excluded (incidence >69.11 per 100,000 population), and the unsupervised k-means learning algorithm was applied for clustering. Cluster validity was assessed using the Silhouette Index (SI) and Davies–Bouldin Index (DBI). **Results:** Five endemicity levels were identified: low (<13.60), moderate (13.60–22.91), high (22.91–33.70), very high (33.70–48.79), and hyperendemic (>48.79 per 100,000 population). Validation

[1] Universidade Federal do Pará, Altamira – PA.
[2] Núcleo de Medicina Tropical/Universidade Federal do Pará, Belém – PA.

SUBMETIDO EM: 8/2026 | **ACEITO EM: 8/2026** | **PUBLICADO EM: 10/2026**

indicated well-defined clusters (DBI = 0.59 and SI values predominantly above 0.50). Seven of the nine state capitals were among the hyperendemic municipalities, and an additional 232 municipalities were classified as having very high or hyperendemic levels. **Conclusion:** The proposed classification provides a robust tool for epidemiological surveillance and public health planning, enabling the identification of the municipalities most vulnerable to tuberculosis.

Keywords: Tuberculosis, Endemicity, Health indicators.

RESUMEN

Objetivo: Establecer niveles de endemicidad de la tuberculosis en la Amazonía brasileña e identificar los municipios relevantes para el mantenimiento de la enfermedad. **Métodos:** Se realizó un estudio ecológico y analítico con datos de notificación de casos nuevos de tuberculosis registrados entre 2009 y 2024 en municipios de la Amazonía brasileña. Los datos de notificación de la enfermedad y los datos demográficos se obtuvieron del Sistema de Información de Enfermedades de Notificación Obligatoria y del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística. Se calcularon las tasas de incidencia, se identificaron y excluyeron los valores atípicos (incidencia > 69,11 por 100.000 habitantes) y se aplicó el algoritmo no supervisado *k-means* para la agrupación. La validación de los grupos se realizó mediante los índices de Silhouette (IS) y de Davies-Bouldin (IDB). **Resultados:** Se identificaron cinco niveles de endemicidad: bajo (< 13,60), medio (13,60–22,91), alto (22,91–33,70), muy alto (33,70–48,79) e hiperendémico (> 48,79 por 100.000 habitantes). La validación mostró grupos bien definidos (IDB = 0,59 e IS predominantemente superiores a 0,50). Siete de las nueve capitales estatales se encontraban entre los municipios hiperendémicos, y otros 232 municipios fueron clasificados en los niveles muy alto e hiperendémico. **Conclusión:** La clasificación propuesta ofrece una herramienta sólida para la vigilancia epidemiológica y la planificación en salud pública, al permitir identificar los municipios más vulnerables a la tuberculosis.

Palabras clave: Tuberculosis, Endemicidad, Indicadores de salud.

INTRODUÇÃO

A tuberculose é uma doença infectocontagiosa causada pelo *Mycobacterium tuberculosis*, com tropismo predominante pelo parênquima pulmonar, embora possa também comprometer outros órgãos e sistemas, como ossos, articulações e sistema nervoso central. Suas manifestações clínicas mais características incluem tosse persistente por mais de duas semanas, emagrecimento progressivo, astenia, febre vespertina, sudorese noturna, hemoptise e dor torácica. Trata-se de uma condição plenamente evitável, diagnosticável e tratável, ainda assim, permanece como um dos maiores desafios de saúde pública contemporâneos, sobretudo em territórios marcados por pobreza estrutural, vulnerabilidade social acentuada e acesso limitado aos serviços de saúde (SENA IV, et al., 2020).

A persistência da tuberculose como problema de saúde pública está intimamente relacionada aos determinantes sociais da saúde. Por sua distribuição desproporcional entre populações socialmente vulnerabilizadas e por seu papel na reprodução de desigualdades, com repercussões diretas no desenvolvimento social e econômico de países de baixa e média renda, a doença é classicamente classificada como negligenciada (BRASIL, 2025). Nesse sentido, o adoecimento por tuberculose não pode ser compreendido exclusivamente sob a ótica biológica: ele expressa, em grande medida, condições históricas de exclusão social, precariedade habitacional, insegurança alimentar, baixa renda e barreiras persistentes no acesso oportuno à atenção à saúde.

Ainda que existam investimentos voltados à pesquisa e ao controle da tuberculose, estes permanecem insuficientes frente à magnitude e à cronicidade do problema. Parcela relevante do conhecimento científico produzido não se converte, de forma plena, em avanços terapêuticos, métodos diagnósticos mais sensíveis e específicos, ou vacinas capazes de ampliar significativamente a prevenção e o controle da doença.

Adicionalmente, a baixa atratividade econômica do tema para o setor privado restringe o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao seu enfrentamento, o que reforça sua condição de doença negligenciada no campo da ciência, tecnologia e inovação em saúde (BRASIL, 2021; MOREL MC, 2006).

No contexto brasileiro, a endemicidade da tuberculose resulta de uma interação complexa entre a carga da doença, sua distribuição desigual no território nacional e os determinantes sociais que a sustentam. Esse cenário adquire particular relevância na Amazônia Legal, região composta por nove estados que, em conjunto, correspondem a aproximadamente 60% do território brasileiro. Nessa vasta e heterogênea extensão territorial, desafios estruturais, socioeconômicos, geográficos e logísticos concorrem para a manutenção da cadeia de transmissão e dificultam o acesso oportuno ao diagnóstico, ao tratamento e ao acompanhamento longitudinal dos casos (DAMM Y, et al., 2024).

Estudos de abrangência nacional têm evidenciado forte autocorrelação espacial da tuberculose no Brasil, com aglomerados de alta incidência concentrados de maneira persistente nas regiões Norte e Nordeste do país (PELISSARI DM, et al., 2018). Tais achados reforçam a influência das desigualdades territoriais, das barreiras estruturais de acesso aos serviços de saúde e das dificuldades logísticas historicamente presentes em determinadas regiões brasileiras. Assim, a compreensão da dinâmica epidemiológica da tuberculose na Amazônia demanda uma abordagem integrada, que articule aspectos clínicos e biomédicos às condições socioeconômicas, geográficas e de organização dos serviços de saúde — perspectiva especialmente necessária para reconhecer que populações vulnerabilizadas estão mais expostas ao adoecimento e a desfechos desfavoráveis (DAMM Y, et al., 2024).

A Organização Mundial da Saúde utiliza o coeficiente de incidência como um dos principais parâmetros para a classificação de áreas de risco, em conjunto com indicadores de mortalidade e com a análise da ocorrência da doença em subgrupos populacionais particularmente vulneráveis, como povos indígenas, pessoas privadas de liberdade e indivíduos em situação de extrema pobreza. No contexto amazônico, contudo, a análise epidemiológica exige atenção redobrada à heterogeneidade regional, uma vez que a concentração de casos em grandes centros urbanos pode coexistir com episódios de elevada ocorrência em territórios indígenas, áreas remotas e regiões de fronteira econômica (DE SOUZA NKM, et al., 2025; WHO, 2024).

Diante desse cenário de heterogeneidade espacial e social, torna-se fundamental identificar os municípios mais afetados e as áreas de maior risco para a transmissão da tuberculose na Amazônia Legal, considerando as particularidades epidemiológicas e sociais de cada território. A proposição de novos níveis de endemicidade adaptados à realidade regional pode contribuir para qualificar a vigilância epidemiológica, orientar a priorização de recursos assistenciais e subsidiar a formulação de políticas públicas mais equitativas. Espera-se, com isso, que a análise ultrapasse os indicadores estritamente biomédicos e incorpore as desigualdades estruturais que sustentam a tuberculose como um persistente problema de saúde pública na Amazônia Legal (LIMA NRO, et al., 2025).

MÉTODOS

Este estudo seguiu as recomendações da Declaração de Helsinki e utilizou dados epidemiológicos secundários, agregados e não identificáveis referentes a pacientes notificados com tuberculose residentes nos municípios da Amazônia Legal. Por se tratar de dados secundários e de domínio público, sem possibilidade de identificação individual, a pesquisa está isenta de apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos, conforme as Resoluções nº 510/2016 e nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde. O estudo observou, ainda, as diretrizes da Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD — Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018).

Trata-se de um estudo epidemiológico do tipo ecológico e analítico, com o objetivo de classificar os níveis de endemicidade da tuberculose na Amazônia Legal brasileira. A região corresponde a aproximadamente 60% do território nacional e abrange nove estados: Acre (22 municípios), Amapá (16 municípios), Amazonas (62 municípios), Mato Grosso (141 municípios), Pará (144 municípios), Rondônia (52 municípios), Roraima

(15 municípios), Tocantins (139 municípios) e parte do estado do Maranhão (181 municípios) (IBGE, 2026). A população-alvo do estudo foi composta pelos pacientes notificados com tuberculose no período de 2009 a 2024, residentes nos 772 municípios que compõem a Amazônia Legal.

Os dados de notificação de casos novos de tuberculose em residentes nos municípios da AL foram obtidos junto ao Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), por meio da ferramenta TABWIN, disponibilizada pelo Ministério da Saúde do Brasil. As informações geográficas e demográficas foram obtidas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a partir de sua plataforma eletrônica. Foram utilizados os limites territoriais dos municípios, bem como seus respectivos dados demográficos, geocodificados segundo a projeção geográfica e o Datum do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000). Todos os casos notificados de tuberculose, e seus respectivos indicadores, foram associados aos limites territoriais dos municípios de residência, dentro dos limites da Amazônia Legal.

Procedeu-se à tabulação, limpeza e tratamento da base de dados, com identificação de informações faltantes e de eventuais duplicidades de registro. Em seguida, calcularam-se as taxas de casos novos (incidência) de tuberculose por 100.000 habitantes, para a população residente, por ano e por município. A partir dessas séries, obteve-se a incidência média do período de estudo (2009–2024) e determinaram-se os valores de quartis, amplitude interquartílica e outliers para os dados de incidência.

Para a identificação dos níveis de endemicidade, aplicou-se o algoritmo K-means, técnica de aprendizado não supervisionado amplamente utilizada para tarefas de clusterização, cujo princípio consiste em minimizar a soma dos quadrados das distâncias euclidianas entre cada observação e o centroide de seu respectivo agrupamento (cluster). Previamente à aplicação do K-means, realizou-se a limpeza e a normalização dos dados, de modo a padronizar as variáveis e evitar que diferenças de escala influenciassem indevidamente o cálculo das distâncias (MOMAHHED SS, et al., 2023).

No processo de análise por K-means, o número de agrupamentos (k) e os valores iniciais dos centroides são definidos no início do procedimento. Em seguida, o algoritmo calcula iterativamente a menor distância entre cada observação e os centroides, distribuindo o conjunto de dados em k agrupamentos. A cada nova iteração, os valores dos centroides são recalculados dinamicamente, buscando maior precisão na definição do centro de cada grupo. O processo se repete até que não haja mais realocação de observações entre clusters em uma dada iteração, indicando a convergência do algoritmo e o estabelecimento das atribuições finais de cluster.

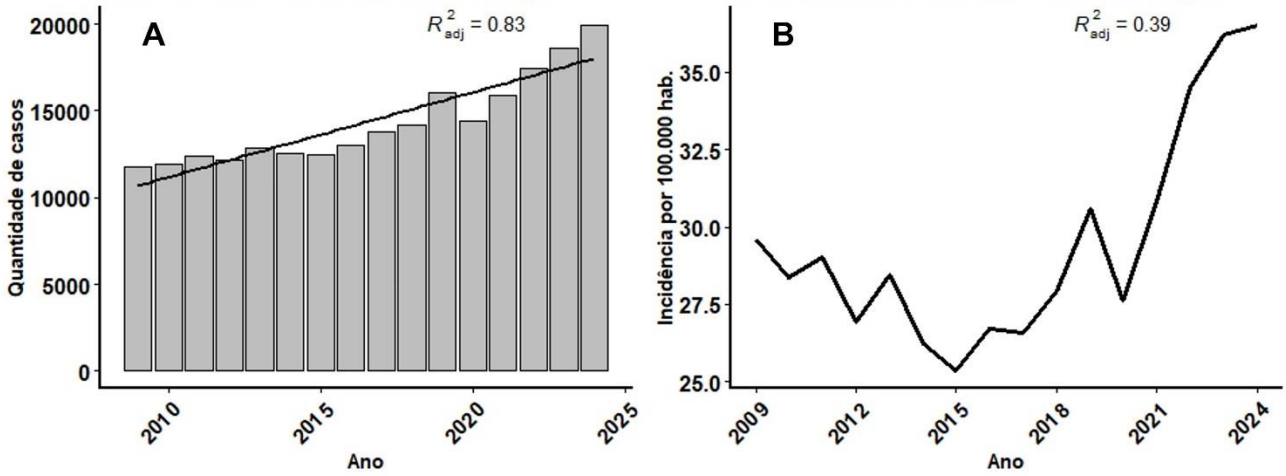
Adicionalmente ao processo de clusterização, tratou-se de valores discrepantes (outliers) por meio da amplitude interquartílica (IQR = Q3 – Q1), estabelecendo-se o limite superior como Q3 + 1,5 × IQR, conforme metodologia descrita por De Sá et al. (2023). A partir desse critério, foram excluídos 38 municípios cujas taxas médias de incidência ultrapassaram o limiar de 69,11 casos por 100.000 habitantes, de modo a assegurar a consistência dos dados e mitigar distorções na classificação final.

A validação dos agrupamentos resultantes foi realizada por meio do Índice de Silhouette (IS) e do Índice de Davies-Bouldin (IDB), permitindo avaliar comparativamente, de forma global e individual, a consistência interna e a eficiência do modelo de clusterização (MOMAHHED SS, et al., 2023). Essa etapa foi essencial para testar a sensibilidade dos escores obtidos na caracterização do padrão epidemiológico da tuberculose na região amazônica, conferindo maior robustez à classificação proposta.

RESULTADOS

Após o processamento e a filtragem da base de dados, identificou-se um total de 229.637 casos notificados de tuberculose em residentes dos 772 municípios da Amazônia Legal, no período compreendido entre 2009 e 2024. A distribuição temporal dessas notificações revelou uma expressiva tendência ascendente ao longo de toda a série histórica analisada (R^2 = 0,84) (**Figura 1A**). Paralelamente, o comportamento da taxa de incidência no mesmo período, a despeito de uma retração pontual registrada em 2015, evidenciou trajetória de crescimento consistente, com intensificação particularmente acentuada a partir de 2019 (**Figura 1B**).

Figura 1 - Casos notificados e incidência de tuberculose na Amazônia Legal, no período de 2009 a 2024.



*Série histórica de casos notificados (A) e incidência (B) de tuberculose na Amazônia Legal.
Fonte: Ferreira DVG, et al., 2026. Dados extraídos do Tabwin/Datasus, 2025.

Para a estratificação do grau de endemicidade da tuberculose na Amazônia Legal, adotou-se como parâmetro a taxa de incidência média por 100.000 habitantes em cada município. Como descrito na seção de Métodos, foram excluídos 38 municípios que ultrapassaram o limiar de 69,11 casos por 100.000 habitantes, considerados outliers pelo critério da amplitude interquartílica. A base de dados depurada foi então submetida ao algoritmo de agrupamento K-means, permitindo a classificação dos municípios remanescentes em cinco estratos distintos de incidência média. A robustez e a coerência interna dessa partição foram avaliadas pelos Índices de Silhouette (IS) e Davies-Bouldin (IDB), cujos resultados estão sintetizados na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Grau de endemicidade determinado para a Amazônia legal.

Níveis de Endemicidade	Taxa de casos novos por 100.000 hab.	Grupo k-means	Tamanho do cluster	IS	IDB
Baixo	< 13,60	3	159	0,59	
Médio	13,6 a 22,91	5	196	0,55	
Alto	22,91 a 33,70	1	178	0,52	0,59
Muito Alto	33,70 a 48,79	2	140	0,49	
Hiperendêmico	> 48,79	4	61	0,62	

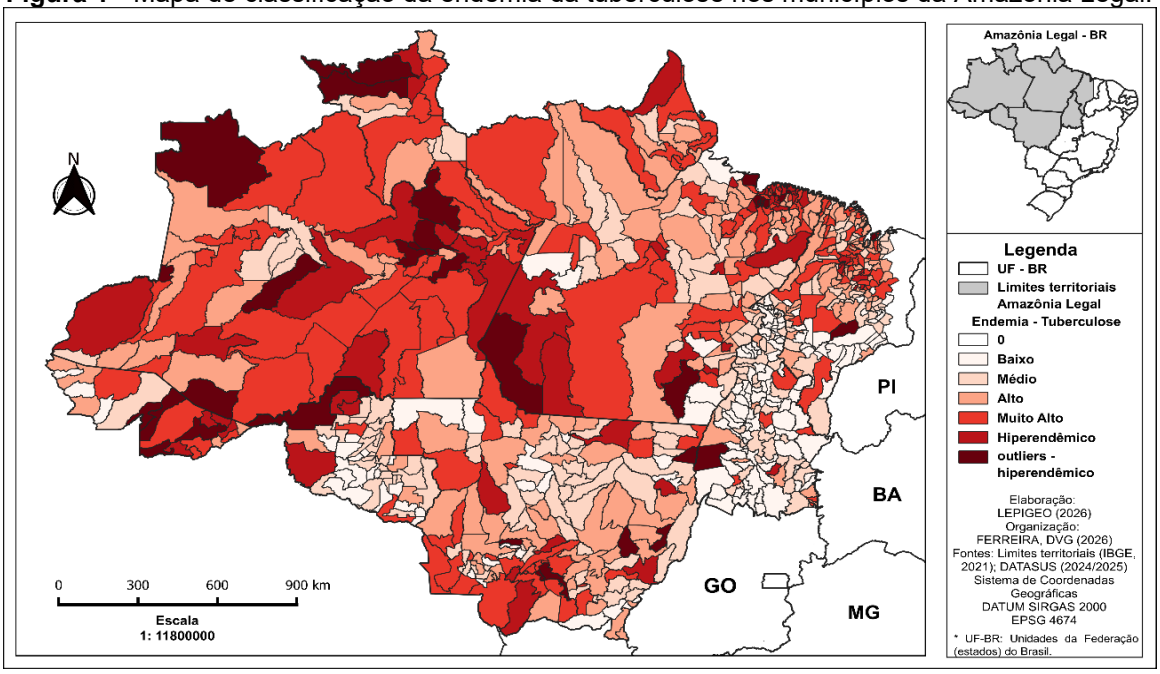
IS = índice de Sillhouette; IDB = índice de Davies-Bouldin

Fonte: Ferreira DVG et al., 2026. Dados extraídos do Tabwin/Datasus, 2025.

Os grupos 3 (Baixo), 5 (Médio), 1 (Alto) e 4 (Hiperendêmico) apresentaram Índice de Silhouette acima de 0,50, permitindo classificá-los como agrupamentos bem definidos. O grupo 2 (Muito Alto) obteve IS de 0,49, valor que representa uma estrutura de agrupamento razoável, ainda assim aceitável para os fins da classificação proposta.

O Índice de Davies-Bouldin foi de 0,59 para o conjunto dos agrupamentos, indicando qualidade regular a aceitável da partição. Em síntese, o IDB e os valores de IS dos grupos definidos pelo algoritmo K-means representam adequadamente os diferentes níveis de endemicidade da tuberculose entre os municípios da Amazônia Legal, permitindo utilizá-los com segurança na investigação da distribuição espacial, do risco de transmissão e da manutenção da doença na região (**Figura 1**).

Figura 1 - Mapa de classificação da endemia da tuberculose nos municípios da Amazônia Legal.



Fonte: Ferreira DVG, et al., 2026. Dados extraídos do Tabwin/Datasus e IBGE, 2025.

A análise da classificação dos 772 municípios da Amazônia Legal pelo algoritmo K-means distribuiu as localidades em cinco estratos de endemicidade para tuberculose: Hiperendêmico, Muito Alto, Alto, Médio e Baixo. A distribuição espacial está representada na **Figura 1**.

O estrato de municípios Hiperendêmicos concentrou 99 municípios (12,8% do total), com incidência média de 73,0 casos por 100.000 habitantes (variação: 49,1 a 285,3 casos/100.000). O estado do Pará liderou em número absoluto de municípios nesse estrato, com 36 municípios (36,4% do estrato), seguido pelo Amazonas, com 20 municípios (20,2%), Mato Grosso, com 13 (13,1%), Maranhão, com 11 (11,1%), Acre, com 8 (8,1%), Rondônia e Roraima, com 4 municípios cada (4,0%), Tocantins, com 2 (2,0%), e Amapá, com 1 município (1,0%).

Entre os municípios com as maiores taxas de incidência no estrato Hiperendêmico, destacam-se Santa Izabel do Pará/PA (285,3 casos/100.000), Campinápolis/MT (253,1 casos/100.000), Marituba/PA (138,1 casos/100.000), Manaus/AM (126,7 casos/100.000) e Belém/PA (119,6 casos/100.000). Municípios com expressiva população indígena também figuram entre os de maior incidência nesse estrato, como Jacareacanga/PA (111,2 casos/100.000), São Gabriel da Cachoeira/AM (104,8 casos/100.000) e Santa Rosa do Purus/AC (96,6 casos/100.000). Adicionalmente, sete das nove capitais da Amazônia Legal integram o cluster Hiperendêmico: Manaus, Belém, Porto Velho (90,4 casos/100.000), Cuiabá (87,5), Rio Branco (85,1), São Luís (83,9) e Boa Vista (50,8).

No estrato de Muito Alta Endemicidade, foram registrados 140 municípios (18,1% do total), com taxa média de 39,8 casos por 100.000 habitantes (variação: 33,9 a 48,8 casos/100.000). O Maranhão apresentou a maior quantidade de municípios nesse estrato (n = 37), seguido do Pará (n = 32), Mato Grosso (n = 24), Amazonas (n = 23), Amapá (n = 7), Tocantins (n = 6), Acre (n = 5), Roraima (n = 4) e Rondônia (n = 2). Destacam-se, nesse estrato, a capital Macapá/AP (45,0 casos/100.000) e os municípios de Chapada dos Guimarães/MT (48,8), Marapanim/PA (48,4), Plácido de Castro/AC (48,2) e Cáceres/MT (48,1).

No estrato de Alta Endemicidade, agruparam-se 178 municípios (23,1% da Amazônia Legal), com incidência média de 27,8 casos por 100.000 habitantes (variação: 23,1 a 33,7 casos/100.000). A maior concentração de municípios nesse nível ocorreu no Maranhão (n = 58), seguido pelo Pará (n = 41) e pelo Mato Grosso (n = 39). Entre as localidades mais representativas, figuram Igarapé do Meio/MA (33,7 casos/100.000), Boa Vista do Ramos/AM (33,7 casos/100.000), Barra do Corda/MA (33,7 casos/100.000) e Imperatriz/MA (33,3 casos/100.000).

O estrato de Média Endemicidade reuniu o maior quantitativo absoluto de municípios, com 196 localidades (25,4% do total), apresentando incidência média de 18,3 casos por 100.000 habitantes (variação: 13,6 a 22,9 casos/100.000). Mato Grosso (n = 47) e Maranhão (n = 46) foram os estados predominantemente representados, seguidos por Tocantins (n = 36) e Pará (n = 29). Esse grupo abrange a capital Palmas/TO (15,7 casos/100.000).

Por fim, o estrato de Baixa Endemicidade englobou 159 municípios (20,6% do total), com incidência média de 8,9 casos por 100.000 habitantes (variação: 1,0 a 13,5 casos/100.000). O estado do Tocantins concentrou mais da metade dos municípios desse estrato (n = 87; 54,7%), seguido por Maranhão (n = 29), Mato Grosso (n = 18), Rondônia (n = 16), Pará (n = 6) e Acre (n = 3). Notadamente, os estados do Amazonas, Amapá e Roraima não apresentaram nenhum município classificado nesse estrato de menor carga da doença.

DISCUSSÃO

A classificação por K-means revelou acentuada heterogeneidade espacial na distribuição da tuberculose na Amazônia Legal, com concentração expressiva de municípios em estratos de alta a hiperendemicidade, 54,0% do total de localidades (n = 417) situam-se nos níveis Alto, Muito Alto ou Hiperendêmico. Esse padrão é consistente com estudo de abrangência nacional que identificou a Região Norte como área de persistente concentração espacial de altas taxas de incidência de tuberculose no Brasil, reforçando que a heterogeneidade observada não é um fenômeno isolado, mas reflexo de um padrão histórico e estrutural de desigualdade territorial na distribuição da doença (CHAKAYA J, et al., 2021; PELISSARI DM, et al., 2018).

Os determinantes sociais da saúde e as assimetrias na organização da rede de atenção básica moldam de forma decisiva a transmissão do *Mycobacterium tuberculosis* na região amazônica (HARLING G e CASTRO MC, 2014; SAN PEDRO A e OLIVEIRA RM, 2013). A forte concentração de municípios hiperendêmicos no Pará (n = 36) e no Amazonas (n = 20), incluindo sete das nove capitais regionais, evidencia o efeito da urbanização acelerada e não planejada, caracterizada por adensamento habitacional, periferização e vulnerabilidade socioeconômica, fatores amplamente reconhecidos por favorecerem a sustentação da cadeia de transmissão e óbitos por tuberculose (BHARGAVA A e BHARGAVA M, 2020; MACIEL EL e REIS-SANTOS B, 2015). Paralelamente, a expressiva presença de municípios com relevante população indígena e áreas rurais isoladas nesse mesmo estrato crítico como Jacareacanga/PA, São Gabriel da Cachoeira/AM e Santa Rosa do Purus/AC expõe barreiras geográficas extremas de acesso ao diagnóstico precoce e ao acompanhamento terapêutico (OU X, et al, 2025; PELISSARI DM, et al., 2018).

O expressivo aumento na proporção de municípios classificados no estrato de maior incidência entre 2021 e 2024 (de 11,3%–13,3% para 21,0% dos municípios, aumento de quase 76% em relação ao primeiro quadriênio da série) sugere possível relação com o retrocesso assistencial induzido pela pandemia de COVID-19, fenômeno amplamente documentado internacionalmente como causador de subdiagnóstico durante o período pandêmico, seguido de um "efeito rebote" de casos represados nos anos subsequentes (WHO, 2024). Essa hipótese, embora plausível e coerente com o padrão observado em outros contextos globais, não pôde ser testada diretamente neste estudo, constituindo questão relevante para investigações futuras que incorporem, por exemplo, análises de interrupção de série temporal (*interrupted time-series analysis*).

Em contrapartida, apenas 91 dos 772 municípios da Amazônia Legal (11,8%), correspondentes ao estrato de Baixa Endemicidade, apresentam incidência média alinhada à meta final estabelecida pela *End TB Strategy* da Organização Mundial da Saúde (OMS), de atingir menos de 10,0 casos por 100.000 habitantes até 2035 (WHO, 2023). A distribuição geográfica desse pequeno contingente de municípios revela expressiva assimetria regional: o estado do Tocantins concentra a ampla maioria desse grupo (n = 60; 65,9%), com destaque para municípios com as menores taxas de todo o estudo, como Rio Sono (1,0 caso/100.000) e São Salvador do Tocantins (2,0 casos/100.000). Em menor escala, figuram municípios do Maranhão (n = 15), Rondônia (n = 7), Mato Grosso (n = 5), Acre (n = 2) e Pará (n = 2). Por outro lado, estados inteiros como Amazonas, Amapá e Roraima não possuem um único município dentro da meta da OMS, achado que reforça a marcada disparidade intrarregional na Amazônia Legal.

É importante considerar que o alcance formal desse parâmetro em pequenos municípios de área rural ou interiorana pode não traduzir exclusivamente controle efetivo da doença, podendo também ocultar cenários de subnotificação diagnóstica, decorrentes da reduzida capacidade operacional das redes locais de vigilância e do fluxo assistencial frágil na Atenção Primária à Saúde (BRASIL, 2019; OU X, et al., 2025; SAN PEDRO A e OLIVEIRA RM, 2013). Essa possibilidade impõe cautela na interpretação de baixas incidências em contextos de vulnerabilidade estrutural, nos quais a ausência de casos notificados pode, paradoxalmente, sinalizar falhas no acesso ao diagnóstico, e não ausência de transmissão.

Uma vez que 88,2% das localidades amazônicas (n = 681) ainda superam o limiar internacional preconizado pela OMS, e que o estrato hiperendêmico registra incidência média de 73,0 casos por 100.000 habitantes, 7,3 vezes acima da meta, evidencia-se a urgência de intervenções governamentais territorializadas e diferenciadas. Tais políticas devem fortalecer a busca ativa diagnóstica por meio do Subsistema de Atenção à Saúde Indígena (SASI-SUS) nas áreas de difícil acesso, e implementar medidas de proteção social intersetoriais nas zonas urbanas hiperendêmicas (BOCCIA D, et al., 2011; MACIEL EL e REIS-SANTOS B, 2015; WHO, 2023).

A associação entre urbanização desordenada, adensamento populacional e manutenção da transmissão é amplamente respaldada por revisão sistemática internacional sobre indicadores socioeconômicos e tuberculose, que identificou pobreza urbana, superlotação domiciliar e baixa escolaridade como preditores robustos de maior incidência em diferentes contextos globais (SAN PEDRO A e OLIVEIRA RM, 2013). Esse conjunto de evidências converge para a compreensão de que a endemicidade da tuberculose na Amazônia Legal não pode ser dissociada das condições de vida, do padrão de ocupação territorial e da capacidade instalada dos serviços de saúde em cada município (AMARAL CCA, et al., 2021).

Os achados deste estudo fortalecem a necessidade de substituir estratégias uniformes de controle da tuberculose por ações proporcionais ao risco epidemiológico local. Municípios classificados como hiperendêmicos requerem intensificação da busca ativa de casos, diagnóstico rápido, investigação sistemática de contatos, ampliação da oferta de teste rápido molecular, vigilância de resistência medicamentosa, apoio ao tratamento diretamente observado quando indicado, e articulação intersetorial com programas de proteção social (BHARGAVA A e BHARGAVA M, 2020).

Já localidades classificadas em estratos de menor incidência, mas com vulnerabilidade programática identificada, como fragilidade da rede de vigilância epidemiológica ou isolamento geográfico, precisam fortalecer a capacidade de detecção precoce de casos, de modo a evitar a falsa percepção de ausência de risco (NGUYEN TA, et al., 2024).

A classificação de endemicidade proposta neste estudo, validada por meio de índices estatísticos consolidados na literatura de aprendizado de máquina (Silhouette e Davies-Bouldin), representa uma contribuição metodológica relevante para a vigilância epidemiológica da tuberculose na Amazônia Legal. Ao ultrapassar classificações genéricas ou baseadas exclusivamente em cortes arbitrários de incidência, a técnica de clusterização não supervisionada permite captar de forma mais fidedigna os padrões naturais de agrupamento presentes nos dados, oferecendo maior sensibilidade na identificação de municípios prioritários para intervenção.

Como limitações do estudo, destacam-se a natureza ecológica do desenho, que impede inferências causais no nível individual, e a dependência da qualidade dos registros do SINAN, sistema sujeito a subnotificação e a variações na completude dos dados entre municípios e ao longo do tempo. Ainda assim, a magnitude da base de dados analisada (229.637 casos, 772 municípios, 16 anos de série histórica) confere robustez aos padrões identificados e à classificação proposta.

CONCLUSÃO

A classificação em níveis de endemicidade proposta para os municípios da Amazônia Legal, Baixo, Médio, Alto, Muito Alto e Hiperendêmico, demonstrou ser uma ferramenta robusta e estatisticamente validada, capaz de apoiar intervenções mais precisas, fortalecer o planejamento em saúde e ampliar a capacidade de resposta

frente à persistência da tuberculose em ambientes de elevada vulnerabilidade social e territorial. A identificação de sete das nove capitais regionais entre os municípios hiperendêmicos, somada a outros 232 municípios classificados nos níveis Muito Alto e Hiperendêmico, evidencia a magnitude do desafio epidemiológico enfrentado pela região e reforça a necessidade de estratégias de vigilância e controle diferenciadas, territorializadas e sensíveis às particularidades socioeconômicas, geográficas e populacionais da Amazônia Legal. Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise das trajetórias temporais desses estratos, investiguem o impacto da pandemia de COVID-19 sobre a dinâmica de transmissão local e avaliem, prospectivamente, a efetividade de intervenções territorializadas orientadas por essa classificação.

REFERÊNCIAS

1. AMARAL CCA, et al. Comparação do perfil epidemiológico da tuberculose antes e após a COVID-19 no estado do Pará. Revista Eletrônica Acervo Saúde, 2021; 15 (1): 1-9.
2. BOCCIA D, et al. Cash transfer and microfinance interventions for tuberculosis control: review of the impact evidence and policy implications. *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 2011; 15(Suppl 2): S37-S49.
3. BHARGAVA A, BHARGAVA M. Tuberculosis deaths are predictable and preventable: comprehensive assessment and clinical care is the key. *Journal of Clinical Tuberculosis and Other Mycobacterial Diseases*, 2020; 19: 100155.
4. BRASIL. Ministério da Saúde. Manual de recomendações para o controle da tuberculose no Brasil. 2. ed. atual. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/svsa/tuberculose/manual-de-recomendacoes-e-controle-da-tuberculose-no-brasil-2a-ed.pdf. Acessado em: 20 nov. 2025.
5. BRASIL. Ministério da Saúde. Brasil Livre da Tuberculose. Plano Nacional pelo Fim da Tuberculose como Problema de Saúde Pública. Secretaria de Vigilância em Saúde. Ministério da Saúde. Brasília-DF, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/svsa/tuberculose/brasil-livre-da-tuberculose. Acessado em: 25 de nov. 2025.
6. BRAISIL. Ministério da Saúde. Boletim epidemiológico 16: Proteção social e tuberculose no Brasil, 2025; vol. 16. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2025/boletim-epidemiologico-volume-56-no-16.pdf/@@download/file. Acesso em: 28 jul. 2026.
7. CHAKAYA J, et al. Global Tuberculosis Report 2020 – Reflections on the Global TB burden, treatment and prevention efforts. International Journal of Infectious Diseases, 2021; 113 (Suppl 1): S7-S12.
8. DAMM Y, et al. Health benefits of reduced deforestation in the Brazilian Amazon. Commun Earth Environ. 2024;5(1): 693.
9. DE SÁ, ACMGN. et al. Blood count reference intervals for the Brazilian adult population: National Health Survey. Revista Brasileira de Epidemiologia. 2023;26. doi: 10.1590/1980-549720230004.supl.1.1.
10. DE SOUZA NKM, et al. Temporal and spatial persistence of tuberculosis cases in Brazilian municipalities between 2001 and 2022. Ciencia e Saude Coletiva. 2025;30(7).
11. HARLING G, CASTRO MC. A spatial analysis of social and economic determinants of tuberculosis in Brazil. *Health & Place*, 2014; 15: 56-67.
12. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal eletrônico, Disponível em: https://www.ibge.gov.br/. Aceso em 02 fev. 2026.
13. LIMA NR de O, et al. Health in the Legal Amazon: an analysis of morbidity and mortality indicators between 2010 e 2021. Ciencia e Saude Coletiva. 2025; 30(1).
14. MACIEL EL, REIS-SANTOS, B. Determinants of tuberculosis in Brazil: from conceptual framework to practical application. Rev Panam Salud Publica. 2015; 38(1).
15. MOMAHHED SS, et al. K-means clustering of outpatient prescription claims for health insureds in Iran. BMC Public Health. 2023; 23(1).

16. MOREL, MC. Inovação em Saúde e Doenças Negligenciadas. Caderno de Saúde Publica. Rio de Janeiro. Fundação Osvaldo Cruz, 2006; 22 (8): 1522-1523.
17. NGUYEN T-A, et al. Population-wide active case finding as a strategy to end TB. The Lancet Regional Health - Western Pacific. 2024; 46: 101047.
18. OU X, et al. High proportion of tuberculosis recent transmission in rural areas of Northeastern China: a 3-year prospective population-based genotypic and spatial analysis in Hinggan League, China. Amarican Society for Microbiology. Microbiology Spectrum. 2025; 13 (8).
19. PELISSARI DM, et al. Spatial distribution of tuberculosis in Brazil: a nationwide study. BMC Infectious Diseases, London. 2018; 18 (154).
20. SAN PEDRO A, OLIVEIRA, RM. Tuberculosis and socioeconomic indicators: systematic review of the literature. Revista Panamericana de Salud Pública, Washington, DC. , 2013; 33 (4): 294-301.
21. SENA IVO, et al. Estudio clínico-epidemiológico de la coinfección TB-VIH en municipio prioridad: análisis de 10 años. Enferm. glob, Murcia. 2020; 19 (60): 85-119.
22. WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Global tuberculosis report 2023. Geneva: World Health Organization, 2023. Disponível em: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/ cc23b85f-72c0-4177-8137-cb1161da1025/contente. Acessado em: 15 de jul. 2026.
23. WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Global Tuberculosis Report. World Health Organization, 2024. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240102149. Acesso em: 23 ago. 2026.