

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CODÓ/MA – CCCo
CURSO DE LICENCIATURA INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS
NATURAIS/BIOLOGIA

CONTROLE EPIDEMIOLÓGICO EM MODELOS BIOLÓGICOS

JUAN PABLO MONTEIRO DE ASSIS

CODÓ
2026

JUAN PABLO MONTEIRO DE ASSIS

CONTROLE EPIDEMIOLÓGICO EM MODELOS BIOLÓGICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura Interdisciplinar em Ciências Naturais/Biologia Universidade Federal do Maranhão Campus Codó, como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia.

Orientador: Leonardo Rogerio Da Silva Rodrigues

**CODÓ
2026**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Monteiro de Assis, Juan Pablo.

CONTROLE EPIDEMIOLÓGICO EM MODELOS BIOLÓGICOS / Juan
Pablo Monteiro de Assis. - 2026.

33 p.

Orientador(a): Leonardo Rogerio da Silva Rodrigues.

Curso de Ciências Naturais - Biologia, Universidade
Federal do Maranhão, Codó -ma, 2026.

1. Equações. 2. Epidemiologia. 3. Vigilância. I. da
Silva Rodrigues, Leonardo Rogerio. II. Título.

JUAN PABLO MONTEIRO DE ASSIS

CONTROLE EPIDEMIOLÓGICO EM MODELOS BIOLÓGICOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Licenciatura
Interdisciplinar em Ciências
Naturais/Biologia Universidade Federal do
Maranhão Campus Codó, como requisito
parcial para obtenção do grau de
Licenciatura em Ciências
Naturais/Biologia.

Aprovado em 16 de julho de 2026.

Banca Examinadora

(Leonardo Rogerio da Silva Rodrigues, Universidade Federal do Maranhão).

(Joelma Soares da Silva, Universidade Federal do Maranhão).

(Ednilson Barros Barroso, Instituto Federal do maranhão).

À minha família, meu porto seguro e minha maior inspiração. Este TCC simboliza não apenas o fim de uma jornada acadêmica, mas a continuação de um sonho que nasceu do amor, do incentivo e da confiança que sempre recebi de vocês. Que esta conquista seja apenas o primeiro de muitos capítulos de uma história que continuaremos escrevendo juntos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu a graça de superar cada obstáculo ao longo desta jornada. Foi Ele quem me sustentou nos momentos de fraqueza, renovou minhas forças e me deu sabedoria e coragem para seguir lutando pelos meus sonhos. Em todos os passos, foi meu guia, minha esperança e meu refúgio.

A minha família, que nunca deixou faltar incentivo, carinho e compreensão, mesmo nos momentos mais difíceis. Cada gesto de amor de vocês tornou esta etapa tão importante da minha vida possível e inesquecível. Em especial, à minha mãe, meu maior exemplo de amor, cuidado e perseverança, que esteve ao meu lado em todos os momentos, e ao meu padrasto, por todo o apoio, ajuda e incentivo durante essa caminhada. À minha vizinha Graça, meu profundo agradecimento por todo o amor puro e carinho que sempre me ofereceu; sua presença constante e suas orações foram essenciais nessa trajetória. À Dona Célia, deixo minha gratidão pelo suporte.

Ao meu orientador, Leonardo, expresso minha gratidão pelo acompanhamento atento, pela paciência e por acreditar no meu potencial durante toda esta caminhada acadêmica. À UFMA de Codó, agradeço a oportunidade de aprendizado e pelas experiências que me permitiram crescer pessoal e profissionalmente. Aos meus amigos Lívia, Daniel, Arthur, Kairon, Arestes, kamilly e João Eduardo, por compartilharem comigo os aprendizados, desafios, risadas e conquistas, tornando essa jornada muito mais leve e feliz. Aos vários outros amigos que fiz ao longo do caminho, e a todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte da minha caminhada, o meu muito obrigado.

" Não importa o quão devagar você vá, desde que não pare."

— *Confúcio*

RESUMO

A dengue é considerada atualmente a arbovirose de maior impacto no mundo, com estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS) apontando que 3,5 bilhões de pessoas vivem em áreas de risco. No Brasil, *Aedes aegypti* consolidou-se como vetor primário, e *Aedes albopictus* como vetor secundário, ambos altamente adaptados ao meio urbano. Este estudo integra três dimensões analíticas: (i) dados epidemiológicos de dengue notificados no município de Codó–MA (2014–2023), (ii) experimentos laboratoriais sobre o ciclo de vida do vetor e (iii) modelagem matemática baseada em López *et al.* (2012), com equações diferenciais com retardo. A série histórica apresentou o maior número de notificações em 2016 e de casos confirmados em 2022; no experimento, os grupos com ovos armazenados por mais tempo exibiram eclosão mais tardia e menor emergência de adultos. O modelo foi configurado com condições iniciais baseadas nos dados locais, parâmetros da literatura e referências biológicas do experimento, permitindo comparar cenários de transmissão e controle. Entre os cenários avaliados, o controle simultâneo de 40% nos três componentes produziu a maior supressão das populações infectadas e vetoriais. Os resultados reforçam que a integração entre vigilância epidemiológica, experimentação entomológica e modelagem matemática pode subsidiar o planejamento de ações de saúde pública.

Palavras-chave: equações diferenciais; *Aedes aegypti*; epidemiologia; vigilância; saúde pública.

ABSTRACT

Dengue is currently considered the arboviral disease with the greatest global impact, with estimates from the World Health Organization (WHO) indicating that approximately 3.5 billion people live in risk areas. In Brazil, *Aedes aegypti* is the primary vector, whereas *Aedes albopictus* is a secondary vector, both highly adapted to urban environments. This study integrates three analytical dimensions: (i) epidemiological records of dengue in Codó, Maranhão, Brazil (2014–2023); (ii) laboratory experiments on the vector life cycle; and (iii) mathematical modeling based on López *et al.* (2012), using delay differential equations. The historical series showed the highest number of notifications in 2016 and the highest number of confirmed cases in 2022; in the experiment, groups with longer egg-storage periods showed later hatching and lower adult emergence. The model was configured with initial conditions based on local data, parameters from the literature, and biological references from the experiment, enabling comparison of transmission and control scenarios. Among the evaluated scenarios, simultaneous 40% control in all three components produced the greatest suppression of infected human and vector populations. The findings indicate that integrating epidemiological surveillance, entomological experimentation, and mathematical modeling can support public health planning.

Keywords: differential equations; *Aedes aegypti*; mathematical epidemiology; surveillance; public health.

SUMÁRIO

1 Introdução	11
2 Metodologia	13
2.1 Área de estudo	13
2.2 Delineamento da pesquisa	13
2.3 Dados epidemiológicos	14
2.4 Experimentos laboratoriais	14
2.5 Formulação matemática	15
2.6 Integração dos dados e definição dos parâmetros	19
2.7 Simulações computacionais	20
3 Resultados	21
3.1 Perfil epidemiológico da dengue em Codó–MA	21
3.2 Desenvolvimento experimental de <i>A. aegypti</i>	22
3.3 Cenário sem controle epidemiológico	22
3.4 Controle uniforme de 40%	23
3.5 Controle combinado	24
3.6 Dinâmica das fases imaturas do vetor	25
3.7 Dinâmica da população adulta do vetor	27
4 Discussão	29
5 Conclusão	31
REFERÊNCIAS	32

1 Introdução

As arboviroses emergiram como um dos maiores desafios sanitários do século XXI. Entre elas, a dengue ocupa posição central, tanto pelo alcance geográfico quanto pela magnitude dos impactos sociais, econômicos e de saúde (Gubler, 2011). Em atualização de 2025, a Organização Mundial da Saúde estimou que cerca de metade da população mundial se encontra sob risco de dengue e que ocorram entre 100 e 400 milhões de infecções por ano (World Health Organization, 2025).

No Brasil, a reintrodução do *Aedes aegypti* na década de 1970 e sua rápida dispersão em áreas urbanas criaram condições para epidemias recorrentes, consolidando o vetor como um dos principais problemas de saúde pública do país (Teixeira *et al.*, 2009). Paralelamente, *Aedes albopictus* também passou a desempenhar papel epidemiológico relevante como vetor secundário, especialmente devido à sua elevada capacidade adaptativa em ambientes urbanos e periurbanos. Monitoramentos realizados em Codó confirmam a ocorrência concomitante das duas espécies em áreas urbanas e sua presença em diferentes ambientes antropizados (Santos; Santos, 2022; Souza, 2025). Fatores estruturais como urbanização desordenada, falhas no saneamento básico e armazenamento inadequado de água contribuem para a proliferação desses vetores e para a manutenção dos ciclos de transmissão (Brasil, 2023).

O município de Codó, localizado na região leste do estado do Maranhão, apresenta características climáticas e socioambientais favoráveis ao desenvolvimento e à manutenção de populações de *Aedes*. Estudo local baseado em dados do SINAN e do LIRAa identificou condições de saneamento ambiental favoráveis à proliferação do vetor e limitações na completude e na integração das informações de vigilância (Sousa, 2019). Monitoramentos com ovitrampas em bairros e conjuntos residenciais do município registraram forte variação sazonal na densidade de ovos, com valores mais elevados no período chuvoso (Santos; Santos, 2022; Souza, 2025). Esses achados, associados às oscilações observadas nos registros epidemiológicos municipais, reforçam a necessidade de estratégias integradas de monitoramento e controle.

Embora métodos tradicionais de vigilância entomológica, como índice de Breteau, ovitrampas e densidade de ovos, sejam fundamentais para o acompanhamento populacional do vetor, sua aplicação isolada apresenta limitações quanto à previsão de surtos e à avaliação da efetividade das intervenções. Nesse cenário, a modelagem matemática constitui importante ferramenta analítica, permitindo descrever a dinâmica de transmissão, estimar parâmetros epidemiológicos e simular cenários de controle (Derouich; Boutayeb, 2006). Sistemas que integram informações epidemiológicas, entomológicas e laboratoriais podem ampliar a identificação de áreas de risco e orientar intervenções de saúde pública (Leandro; Maciel-de-Freitas, 2024).

O modelo de López *et al.* (2012), adotado neste estudo, integra humanos nos estados suscetível, infeccioso e imune aos diferentes estágios de desenvolvimento do vetor — ovos, larvas, pupas e mosquitos adultos infectados e não infectados — por meio de um sistema de equações diferenciais com retardos constantes. Essa estrutura representa transições biológicas que não ocorrem instantaneamente e permite testar, em ambiente computacional, o efeito de intervenções dirigidas à população humana e às fases adulta e imatura do vetor.

Além da modelagem matemática, estudos experimentais relacionados ao ciclo biológico de *A. aegypti* contribuem para compreender fatores que influenciam o desenvolvimento e a sobrevivência do vetor. Nesse contexto, a integração entre vigilância epidemiológica, experimentação entomológica e simulações computacionais permite confrontar a estrutura teórica do modelo com referências locais e biológicas, além de subsidiar ações preventivas e políticas públicas, em consonância com abordagens contemporâneas de vigilância integrada (Leandro; Maciel-de-Freitas, 2024).

Dessa forma, o controle epidemiológico torna-se fundamental para compreender e mitigar a propagação da dengue, sendo os modelos matemáticos amplamente utilizados na avaliação de estratégias de intervenção.

Considerando a relevância epidemiológica da dengue no município de Codó-MA, este estudo teve como objetivo principal aplicar o modelo matemático com retardo proposto por López *et al.* (2012) à simulação da dinâmica da doença e à comparação de cenários de controle, integrando a análise de dados epidemiológicos de 2014 a 2023 e observações laboratoriais do ciclo de vida de *A. aegypti* como referências para as condições iniciais e os parâmetros biológicos do modelo.

2 Metodologia

2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no município de Codó, localizado na região leste do estado do Maranhão e integrante da Amazônia Legal brasileira. O município apresenta clima tropical, com elevadas temperaturas e regime pluviométrico sazonal, condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento de *A. aegypti*, principal vetor da dengue no Brasil. Essas características e a ocorrência de registros periódicos da doença justificaram a escolha da área de investigação.

A pesquisa foi conduzida entre janeiro de 2024 e junho de 2025, integrando informações epidemiológicas provenientes da vigilância municipal, experimentos laboratoriais envolvendo o ciclo biológico do vetor e simulações computacionais fundamentadas em modelagem matemática.

2.2 Delineamento da pesquisa

Trata-se de estudo observacional, descritivo e analítico, de abordagem quantitativa, estruturado em três componentes complementares: (i) análise da série epidemiológica da dengue em Codó–MA; (ii) experimento entomológico em condições laboratoriais controladas; e (iii) simulações computacionais do modelo matemático com retardo.

A integração foi orientada pelas variáveis do modelo. Os registros epidemiológicos foram selecionados para caracterizar o comportamento local da dengue e subsidiar as condições iniciais do componente humano. O experimento foi planejado para observar o tempo e as proporções de transição entre ovos, larvas, pupas e adultos, grandezas relacionadas aos compartimentos vetoriais e aos retardos do sistema.

Como a série epidemiológica é anual e o experimento descritivo, esses dados não serviram à estimação direta dos coeficientes de transmissão nem à calibração estatística. Eles forneceram referências locais e biológicas para definir condições iniciais, selecionar parâmetros e interpretar os cenários; os parâmetros não observados foram mantidos conforme a literatura. Assim, as simulações têm finalidade comparativa e exploratória.

2.3 Dados epidemiológicos

Os dados epidemiológicos foram obtidos junto à Secretaria Municipal de Saúde de Codó–MA, utilizando registros oficiais do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), abrangendo o período de 2014 a 2023.

Foram analisadas as informações referentes ao número anual de casos notificados, confirmados e descartados de dengue, considerando exclusivamente os casos confirmados por critério laboratorial ou clínico-epidemiológico, conforme as recomendações do Ministério da Saúde.

Após a obtenção dos dados, realizou-se a organização das informações em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel®), possibilitando a construção da série histórica da doença, a identificação de oscilações temporais e a caracterização dos períodos de maior incidência da dengue no município.

Na integração com o modelo, a média anual de casos confirmados (8,7 no período) foi utilizada como referência para $x_2(0)$, enquanto o tamanho da população humana modelada subsidiou $x_1(0)$. A série histórica não foi empregada para estimar β_x ou β_y , pois registros anuais agregados não permitem identificar diretamente as taxas de contato e transmissão. Os resultados descritivos são apresentados na Seção 3.1.

2.4 Experimentos laboratoriais

Paralelamente à análise epidemiológica, foram realizados experimentos laboratoriais para observar o desenvolvimento de *A. aegypti* sob condições ambientais controladas e obter referências para os parâmetros do componente vetorial do modelo.

Foram utilizados ovos provenientes de seis coletas realizadas entre dezembro de 2024 e maio de 2025, correspondentes a diferentes períodos de armazenamento. Todos os ovos foram introduzidos simultaneamente em incubadora biológica (B.O.D) no dia 22 de maio de 2025, às 14h00, permitindo a comparação entre grupos submetidos às mesmas condições experimentais.

Os experimentos foram conduzidos à temperatura de 28 ± 1 °C. Após a eclosão, dez larvas de cada grupo experimental foram transferidas para recipientes independentes, identificados como 1L, 2L, 3L, 4L, 5L e 6L, contendo água decolorada e ração (Figura 1).

Figura 1 – Recipientes com ovos



Fonte: Acervo do autor (2025).

O acompanhamento foi realizado diariamente até a emergência dos adultos, registrando-se o tempo de eclosão, o desenvolvimento larval, a formação de pupas e a emergência dos mosquitos.

A sobrevivência larval foi estimada pela razão entre o número de pupas obtidas e o número inicial de larvas, enquanto a taxa de emergência foi calculada pela razão entre o número de adultos emergidos e o número de pupas produzidas em cada grupo experimental.

Os parâmetros de interesse foram os tempos de desenvolvimento T_1 (ovo–larva), T_2 (larva–pupa) e T_3 (pupa–adulto), as taxas de transição ω_1 , ω_2 e ω_3 e as taxas de mortalidade ε_1 , ε_2 e ε_3 . O tempo de eclosão forneceu referência para T_1 e ω_1 ; os registros diários das mudanças de estágio forneceram referências para T_2 , T_3 , ω_2 e ω_3 ; e as proporções de pupas e adultos subsidiaram ε_2 e ε_3 . Como o número total de ovos viáveis não foi mensurado, ε_1 não foi estimado diretamente e foi adotado conforme o critério indicado na tabela de parâmetros.

Cada grupo foi acompanhado de forma descritiva, com dez larvas, sem testes inferenciais. Assim, os valores experimentais foram tratados como referências biológicas para o modelo, e não como estimativas populacionais generalizáveis. Os resultados do experimento são apresentados na Seção 3.2.

2.5 Formulação matemática

A dinâmica de transmissão da dengue foi representada por meio do modelo matemático proposto por López *et al.* (2012), composto por um sistema de equações diferenciais com retardos constantes.

Equação 1 – População humana suscetível

$$\frac{dx_1}{dt} = \eta N - \beta_y(1 - u_1)\frac{y_2}{Y}x_1 - \mu x_1 \quad (1)$$

Representa a variação do número médio de pessoas suscetíveis. Inclui o ingresso de indivíduos na população, a infecção causada por mosquitos portadores e a mortalidade natural.

Equação 2 – População humana infecciosa

$$\frac{dx_2}{dt} = \beta_y(1 - u_1)\frac{y_2}{Y}x_1 - \theta x_2(t - \tau) - \mu x_2 \quad (2)$$

Descreve a entrada de novos infectados, a recuperação após o retardo constante τ e a mortalidade dos indivíduos infecciosos.

Equação 3 – População humana imune ou recuperada

$$\frac{dx_3}{dt} = \theta x_2(t - \tau) - \mu x_3 \quad (3)$$

Representa o ingresso de pessoas recuperadas após o período de infecção e a saída por mortalidade natural.

Equação 4 – Mosquitos adultos não portadores do vírus

$$\frac{dy_1}{dt} = \omega_3 z_3(t - T_3) - \beta_{x\frac{x_2}{N}}y_1 - (\delta + u_2)y_1 \quad (4)$$

Inclui a emergência de adultos provenientes das pupas após o tempo T_3 , a infecção dos mosquitos ao picarem pessoas infecciosas e a mortalidade natural ou provocada pelo controle químico.

Equação 5 – Mosquitos adultos portadores do vírus

$$\frac{dy_2}{dt} = \beta_{x\frac{x_2}{N}}y_1 - (\delta + u_2)y_2 \quad (5)$$

Descreve a formação de mosquitos infectados e sua redução por mortalidade natural ou pela aplicação de inseticidas.

Equação 6 – Ovos viáveis

$$\frac{dz_1}{dt} = \phi(y_1 + y_2) - \omega_1 z_1(t - T_1) - (\varepsilon_1 + u_3)z_1 \quad (6)$$

Representa a oviposição realizada pelos mosquitos adultos, a passagem dos ovos para o estágio larval após o tempo T_1 e as perdas naturais ou decorrentes do

controle das fases imaturas.

Equação 7 – Larvas viáveis

$$\frac{dz_2}{dt} = \omega_1 z_1(t - T_1) - \omega_2 z_2(t - T_2) - (\varepsilon_2 + u_3) z_2 \quad (7)$$

Descreve a entrada de larvas provenientes dos ovos, sua transformação em pupas após o tempo T_2 e a mortalidade natural ou induzida pelo controle.

Equação 8 – Pupas viáveis

$$\frac{dz_3}{dt} = \omega_2 z_2(t - T_2) - \omega_3 z_3(t - T_3) - (\varepsilon_3 + u_3) z_3 \quad (8)$$

Representa a formação de pupas, a emergência de mosquitos adultos após o tempo T_3 e as perdas naturais ou causadas pelo controle.

O modelo considera a população humana dividida em indivíduos suscetíveis (x_1), infecciosos (x_2) e recuperados (x_3), enquanto a população vetorial é subdividida em mosquitos adultos não infectados (y_1), mosquitos adultos infectados (y_2), ovos (z_1), larvas (z_2) e pupas (z_3).

Além das variáveis de estado, foram incorporadas três variáveis de controle epidemiológico: u_1 (medidas preventivas), u_2 (controle químico de mosquitos adultos) e u_3 (controle das fases imaturas).

As variáveis, as condições iniciais e os parâmetros empregados estão sistematizados na Tabela 1. Para explicitar sua procedência, os valores foram classificados como derivados dos dados epidemiológicos locais, observados ou calculados a partir do experimento, obtidos na literatura ou definidos teoricamente para os cenários de controle.

Tabela 1 – Variáveis, condições iniciais e parâmetros utilizados na formulação do modelo

Símbolo	Descrição	Valor adotado / unidade	Origem / fonte
Condições iniciais da população humana			
$x_1(0)$	Pessoas suscetíveis (77,1% da população foi modelada para fins de simulação).	91.186 pessoas	IBGE (2025); cálculo do autor.
$x_2(0)$	Pessoas infecciosas (média anual de casos confirmados, 2014–2023).	8,7 pessoas	SMS Codó (2025); cálculo do autor.
$x_3(0)$	Pessoas com imunidade a um sorotipo.	5 pessoas	Condição inicial adotada pelo autor (2025).

Símbolo	Descrição	Valor adotado / unidade	Origem / fonte
N	População humana total: $N = x_1 + x_2 + x_3$.	91.200 pessoas (aprox.)	Cálculo do autor; valor arredondado.
Condições iniciais da população vetorial			
$y_1(0)$	Mosquitos adultos não portadores do vírus.	1.000 mosquitos	Condição inicial adotada pelo autor (2025).
$y_2(0)$	Mosquitos adultos portadores do vírus.	50 mosquitos	Condição inicial adotada pelo autor (2025).
γ	Total de mosquitos adultos: $Y = y_1 + y_2$.	1.050 mosquitos	Cálculo do autor.
$z_1(0)$	Ovos viáveis.	305,5 ovos/armadilha/semana	Condição inicial adotada pelo autor (2025).
$z_2(0)$	Larvas viáveis.	244 larvas	Condição inicial adotada pelo autor (2025).
$z_3(0)$	Pupas viáveis.	244 pupas	Condição inicial adotada pelo autor (2025).
Parâmetros epidemiológicos			
η	Entrada de pessoas suscetíveis na população.	0,004	López <i>et al.</i> (2012)
β_γ	Transmissão do mosquito para o ser humano.	0,375	López <i>et al.</i> (2012);
β_x	Transmissão do ser humano para o mosquito.	0,75	López <i>et al.</i> (2012), cenário II.
θ	Aquisição de imunidade por indivíduos infecciosos.	0,1428 (≈ 7 dias).	López <i>et al.</i> (2012).
μ	Mortalidade natural humana.	0,00042	López <i>et al.</i> (2012).
τ	Tempo até a aquisição de imunidade a um sorotipo.	12 dias	Valor adotado pelo autor (2025).
Parâmetros entomológicos			
δ	Mortalidade mosquito adulto.	0,143	López <i>et al.</i> (2012)
φ	Oviposição dos mosquitos adultos.	4,7 ovos/fêmea/dia	Valor adotado com base em López <i>et al.</i> (2012).
ω_1	Passagem de ovos ao estágio larval.	0,45 dia ⁻¹	Dados experimentais (2025);
ω_2	Passagem de larvas ao estágio de pupa.	0,10 dia ⁻¹	Referência obtida do experimento (2025).
ω_3	Passagem de pupas ao estágio adulto.	0,50 dia ⁻¹	Dados experimentais da pesquisa (2025).
ε_1	Mortalidade natural dos ovos.	0,55 dia ⁻¹	Cálculo do autor, complementar a ω_1 .
ε_2	Mortalidade natural das larvas.	0 dia ⁻¹	Dados experimentais (2025): sobrevivência de 100%.

Símbolo	Descrição	Valor adotado / unidade	Origem / fonte
ε_3	Mortalidade natural das pupas.	0,50 dia ⁻¹	Dados experimentais (2025), com base na menor emergência.
T_1	Desenvolvimento dos ovos até a eclosão.	25–50 horas	Dados experimentais da pesquisa (2025).
T_2	Desenvolvimento das larvas até a fase de pupa.	5 dias	Dados experimentais da pesquisa (2025).
T_3	Desenvolvimento das pupas até a fase adulta.	3 dias	Dados experimentais (2025);
Variáveis de controle			
u_1	Medidas preventivas e educação em saúde.	0,40 no controle uniforme; 0,40 no combinado	López <i>et al.</i> (2012); cenários do autor.
u_2	Controle de mosquitos adultos por inseticidas.	0,40 no controle uniforme; 0,15 no combinado	López <i>et al.</i> (2012); cenários do autor.
u_3	Controle das formas imaturas e eliminação de criadouros.	0,40 no controle uniforme; 0,15 no combinado	López <i>et al.</i> (2012); cenários do autor.

Fonte: Elaborada pelo autor com base em López *et al.* (2012), IBGE (2025), Secretaria Municipal de Saúde de Codó–MA e dados experimentais da pesquisa (2025).

2.6 Integração dos dados e definição dos parâmetros

A definição dos parâmetros seguiu a correspondência entre as fontes de dados e os compartimentos do modelo. No componente humano, os registros epidemiológicos locais subsidiaram $x_1(0)$ e $x_2(0)$; $x_3(0)$ e as condições iniciais vetoriais foram adotados como valores de cenário e estão identificados dessa forma na Tabela 1.

No componente vetorial, as observações laboratoriais foram associadas aos retardos T_1 , T_2 e T_3 , às taxas de transição ω_1 , ω_2 e ω_3 e às taxas de mortalidade ε_1 , ε_2 e ε_3 . Quando o experimento não permitiu estimar diretamente um parâmetro, o valor foi calculado como complemento, adotado como condição de cenário ou mantido conforme a literatura, com a origem indicada na Tabela 1.

Os coeficientes de transmissão β_x e β_y e os demais parâmetros clínicos e demográficos não observados foram obtidos de López *et al.* (2012) ou da literatura citada. As variáveis u_1 , u_2 e u_3 foram definidas teoricamente para comparar estratégias, sem representar uma eficácia medida em campo em Codó–MA. Essa separação entre valores locais, experimentais, bibliográficos e de cenário evita

interpretar as simulações como previsões calibradas.

2.7 Simulações computacionais

As simulações numéricas foram implementadas no software MATLAB® (versão R2025b, MathWorks Inc.), empregando o método clássico de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4), com passo temporal de integração igual a $\Delta t = 0,01$ dia e horizonte de simulação de 60 dias.

As condições iniciais foram definidas conforme a Tabela 1. Avaliaram-se três configurações: (i) ausência de controle, com $u_1 = u_2 = u_3 = 0$; (ii) controle uniforme de 40%, com $u_1 = u_2 = u_3 = 0,40$; e (iii) controle combinado, com $u_1 = 0,40$, $u_2 = 0,15$ e $u_3 = 0,15$, aplicados simultaneamente, conforme o cenário de controle de López *et al.* (2012).

O valor 0,40 representa um coeficiente adimensional de intensidade teórica do controle no modelo, e não a comprovação de 40% de eficácia de uma ação real. A comparação considerou a evolução temporal das populações humanas e vetoriais, com ênfase no número de infectados, na densidade de adultos e na manutenção das fases imaturas ao longo dos 60 dias simulados.

3 Resultados

3.1 Perfil epidemiológico da dengue em Codó–MA

A série histórica de notificações, confirmações e descartes permitiu caracterizar a variação anual da dengue no município (Tabela 2).

Tabela 2 – Casos de dengue notificados, confirmados e descartados em Codó–MA, de 2014 a 2023

Ano	Notificados	Confirmados	Descartados
2014	32	7	25
2015	42	18	24
2016	118	5	113
2017	30	6	24
2018	9	0	9
2019	47	4	43
2020	1	0	1
2021	6	2	4
2022	51	38	13
2023	8	7	1

Fonte: Elaborada pelo autor com dados da Secretaria Municipal de Saúde de Codó–MA (2014–2023).

Entre 2014 e 2023, foram registradas 344 notificações, das quais 87 foram confirmadas e 257 descartadas. O maior número de notificações ocorreu em 2016 (118), mas naquele ano houve cinco confirmações; o maior número de casos confirmados ocorreu em 2022 (38). Em 2023, sete das oito notificações foram confirmadas.

Os valores evidenciam oscilação temporal e mostram que notificações e confirmações representam categorias distintas da vigilância. A média de 8,7 casos confirmados por ano foi utilizada apenas como referência descritiva para $x_2(0)$, sem inferência de tendência ou causalidade.

3.2 Desenvolvimento experimental de *A. aegypti*

Os seis grupos apresentaram sobrevivência completa na transição de larva para pupa, enquanto o tempo de eclosão e a emergência de adultos variaram entre os períodos de coleta (Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados laboratoriais do desenvolvimento de *A. aegypti*

Grupo	Coleta dos ovos	Tempo de eclosão (h)	Larvas iniciais/pupas obtidas	Sobrevivência (%)	Adultos emergidos (%)
1L	dez. 2024	49,7	10/10	100	5 (50%)
2L	jan. 2025	50,0	10/10	100	6 (60%)
3L	fev. 2025	25,7–28,0	10/10	100	8 (80%)
4L	mar. 2025	25,7–28,0	10/10	100	10 (100%)
5L	abr. 2025	25,7–28,0	10/10	100	9 (90%)
6L	maio 2025	25,7–28,0	10/10	100	10 (100%)

Fonte: Elaborada pelo autor com dados da pesquisa (2025).

Os grupos formados com ovos coletados em dezembro de 2024 e janeiro de 2025 apresentaram eclosão após aproximadamente 50 horas e emergência de 50% e 60% dos adultos, respectivamente. Nos grupos de fevereiro a maio de 2025, a eclosão ocorreu entre 25,7 e 28,0 horas e a emergência variou de 80% a 100%.

Descritivamente, os ovos armazenados por mais tempo estiveram associados a eclosão mais tardia e menor emergência de adultos. Como foram utilizadas dez larvas por grupo e não se aplicaram testes inferenciais, esse padrão deve ser interpretado como tendência observada nas condições do experimento.

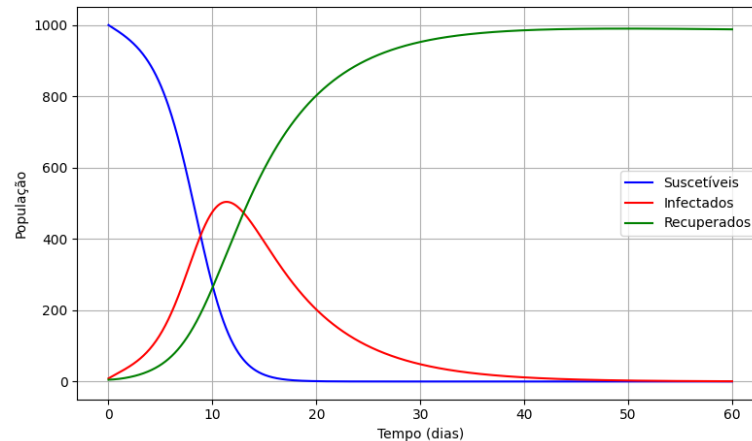
3.3 Cenário sem controle epidemiológico

As simulações numéricas foram inicialmente realizadas considerando a ausência de intervenções epidemiológicas, estabelecendo um cenário basal para comparação com as demais estratégias de controle.

Conforme apresentado na Figura 2, observa-se um crescimento acelerado da população de indivíduos infectados nos primeiros dias da simulação, seguido de redução gradual à medida que aumenta o número de indivíduos recuperados. Esse comportamento é compatível com a dinâmica clássica de modelos epidemiológicos, nos quais a diminuição progressiva da população suscetível limita naturalmente a

propagação da doença.

Figura 2 – Evolução da população humana em um cenário sem controle epidemiológico.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Verifica-se ainda que a população suscetível sofre acentuada redução ao longo do tempo, aproximando-se de valores próximos de zero ao final da simulação. Esse resultado indica que praticamente todos os indivíduos considerados no modelo foram expostos ao vírus durante o surto epidêmico.

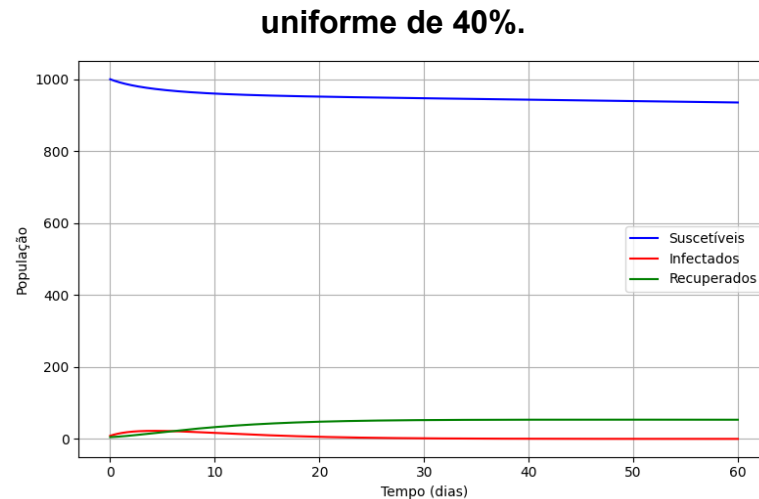
Embora o sistema apresente estabilização natural após o pico de infecção, essa estabilização ocorre somente após intensa circulação viral, evidenciando que a ausência de medidas de controle favorece elevada transmissão da dengue e maior pressão sobre os serviços de saúde.

3.4 Controle uniforme de 40%

No segundo cenário, os três controles foram aplicados simultaneamente com intensidade teórica de 0,40, isto é, $u_1 = u_2 = u_3 = 0,40$.

Os resultados da Figura 3 mostram alteração acentuada da dinâmica epidemiológica em comparação ao cenário sem intervenção. Observa-se redução expressiva do pico epidêmico e manutenção da maior parte da população no estado suscetível.

Figura 3 – Evolução da população humana em um cenário com controle



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A população recuperada apresenta crescimento mais lento, refletindo menor circulação viral ao longo do período analisado. Esses resultados demonstram que medidas de controle de intensidade moderada já são capazes de reduzir substancialmente a propagação da doença.

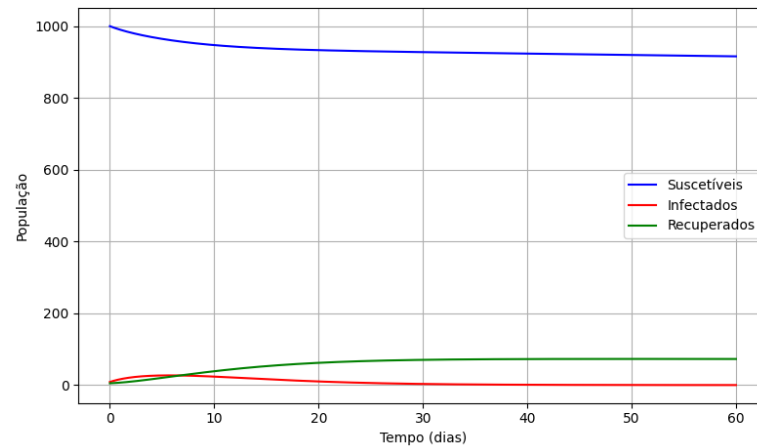
3.5 Controle combinado

O terceiro cenário avaliou a aplicação simultânea de medidas preventivas direcionadas à população humana ($u_1 = 0,40$), controle químico de mosquitos adultos ($u_2 = 0,15$) e controle das fases imaturas ($u_3 = 0,15$).

Conforme ilustrado na Figura 4, o controle combinado reduziu a transmissão em relação ao cenário sem intervenção. Como u_2 e u_3 foram fixados em 0,15, a supressão foi menos intensa que no cenário uniforme de 40%, embora as três frentes de controle tenham atuado simultaneamente.

Figura 4 – Evolução da população humana em um cenário com controle

combinado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

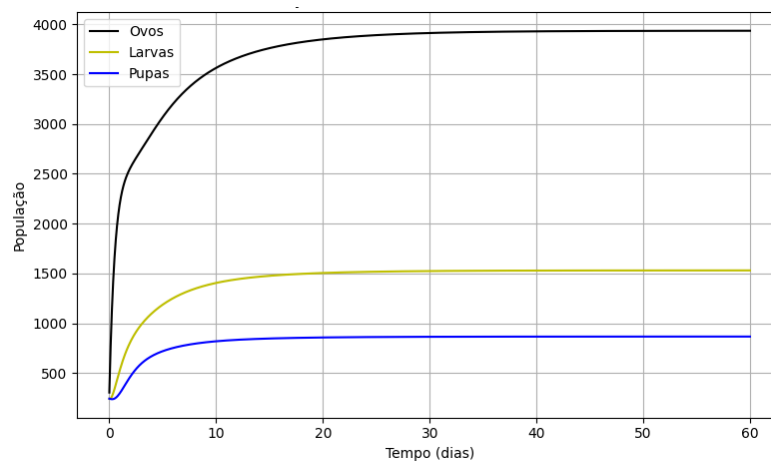
Sob o ponto de vista epidemiológico, esse comportamento evidencia o efeito da ação simultânea sobre a transmissão humana e a densidade vetorial, sem que os coeficientes simulados representem efetividade medida em campo.

3.6 Dinâmica das fases imaturas do vetor

A análise das Figuras 5, 6 e 7 permitiu avaliar o comportamento das populações de ovos, larvas e pupas.

No cenário sem controle (Figura 5), observa-se elevada produção de ovos, seguida do desenvolvimento contínuo das fases larval e pupal, garantindo a reposição da população adulta do vetor. Embora ocorra mortalidade natural, parcela expressiva dos indivíduos completa o desenvolvimento.

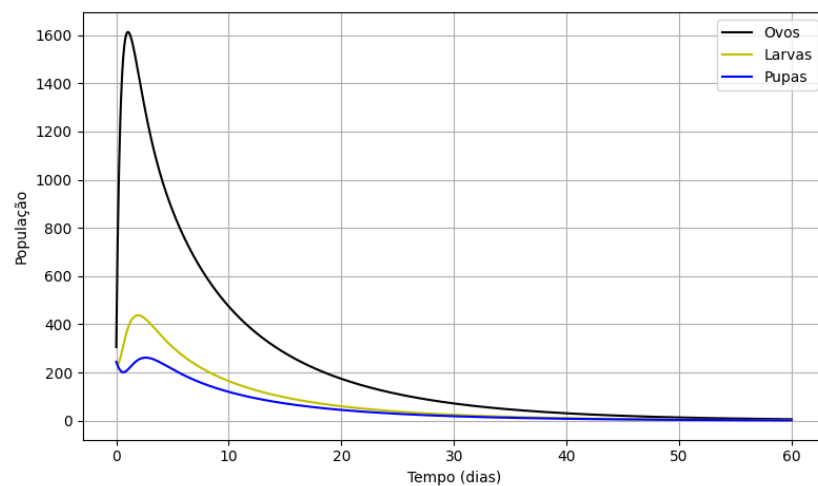
Figura 5 – Evolução das fases imaturas dos vetores em cenário sem controle.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

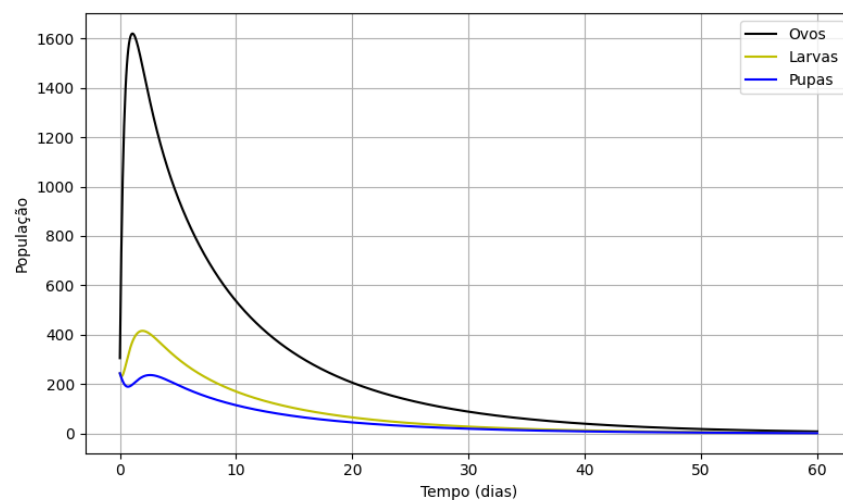
Nos cenários de controle uniforme (Figura 6) e controle combinado (Figura 7), verifica-se redução acentuada das populações larvais e pupais logo nos primeiros dias de simulação. Apesar da permanência da oviposição, o desenvolvimento das fases subsequentes é limitado pelas estratégias de controle, reduzindo de modo expressivo a emergência de mosquitos adultos.

Figura 6 – Evolução das fases imaturas dos vetores em cenário de controle uniforme de 40%.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Figura 7 – Evolução das fases imaturas dos vetores em cenário de controle combinado.



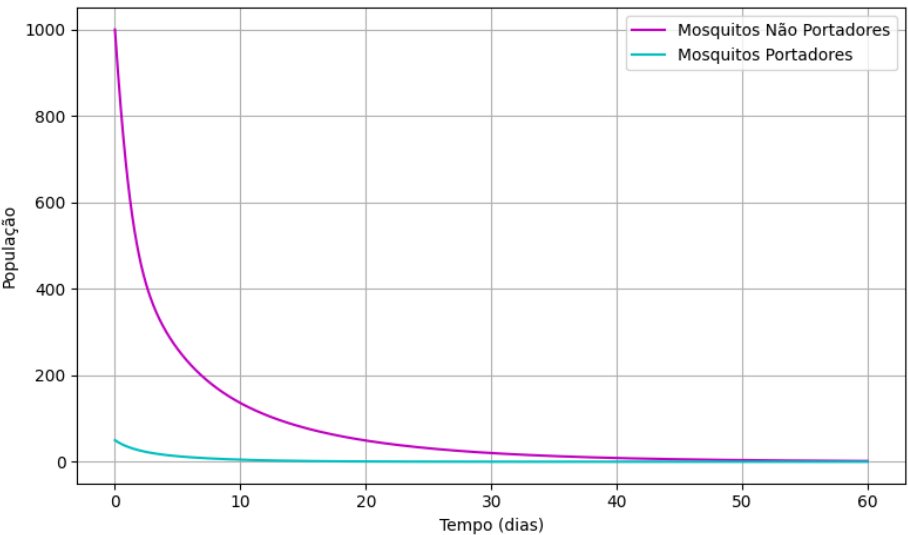
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Esses resultados demonstram que intervenções direcionadas às fases imaturas constituem importante mecanismo para diminuir a densidade vetorial antes que os indivíduos atinjam a fase infectante.

3.7 Dinâmica da população adulta do vetor

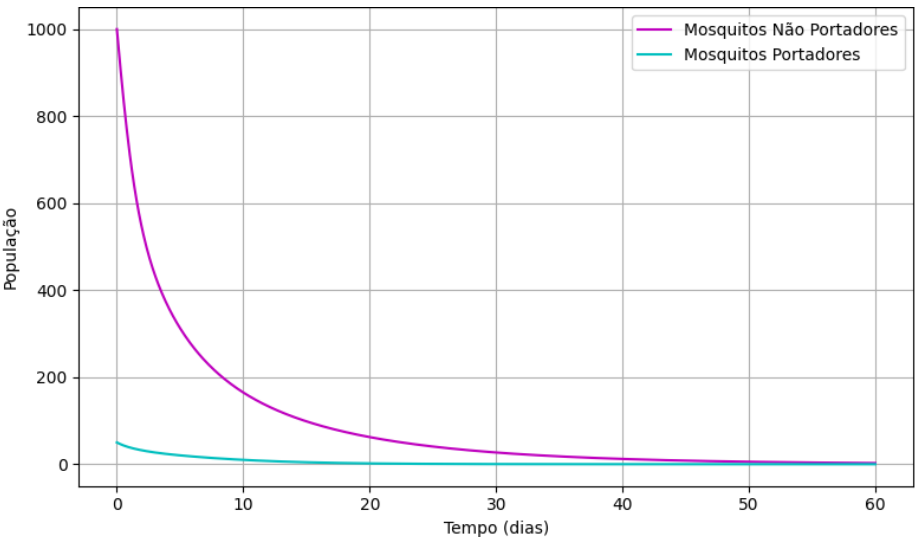
As Figuras 8 e 9 apresentam a evolução das populações de mosquitos adultos infectados e não infectados.

Figura 8 – Evolução de mosquitos adultos em cenário com controle uniforme de 40%.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Figura 9 – Evolução de mosquitos adultos em cenário com controle combinado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Na ausência de controle observa-se crescimento expressivo da população de mosquitos infectados, favorecendo intensa circulação viral durante o período epidêmico. Posteriormente ocorre redução gradual em decorrência da diminuição de

hospedeiros suscetíveis.

Quando medidas de controle são incorporadas ao modelo, observa-se queda imediata das populações de mosquitos adultos, tanto infectados quanto não infectados. Essa redução resulta da atuação conjunta das estratégias sobre diferentes fases do ciclo biológico do vetor.

Como consequência, reduz-se a probabilidade de contato entre mosquitos infectados e indivíduos suscetíveis. A comparação indica vantagem dos controles simultâneos em relação à ausência de intervenção e mostra maior supressão quando os três coeficientes são fixados em 0,40.

4 Discussão

Os resultados mostram que a integração entre dados epidemiológicos, experimentação laboratorial e modelagem matemática permite examinar a dinâmica da dengue por perspectivas complementares. Os dados locais e as observações biológicas foram utilizados como referências para as condições iniciais e para a interpretação dos cenários, sem caracterizar calibração do modelo para Codó-MA.

A série histórica revelou oscilações entre 2014 e 2023, com maior número de notificações em 2016 e maior número de confirmações em 2022. A diferença entre essas categorias impede tratar ambos os anos da mesma forma e reforça a necessidade de qualificar continuamente a investigação epidemiológica. O padrão temporal é compatível com a alternância observada em regiões tropicais, embora o modelo não tenha incorporado explicitamente clima, ambiente ou fatores sociais (Gubler, 2011; Brasil, 2023).

No experimento, todos os grupos apresentaram 100% de sobrevivência entre larvas e pupas, mas os grupos com ovos armazenados por mais tempo tiveram eclosão mais tardia e menor emergência de adultos. A resistência dos ovos de *A. aegypti* às condições adversas é reconhecida na literatura (Marcondes, 2001; Santana; Lima, 2021); contudo, o delineamento descritivo e o número reduzido de indivíduos não permitem atribuir causalidade ou generalizar as proporções observadas.

A utilização do modelo matemático proposto por López *et al.* (2012) mostrou-se adequada para representar a dinâmica epidemiológica da dengue, principalmente por incorporar diferentes estágios do desenvolvimento do vetor e utilizar equações diferenciais com retardos. Ao contrário dos modelos clássicos do tipo SIR, esse modelo descreve explicitamente as transições entre ovos, larvas, pupas e mosquitos adultos, permitindo uma representação mais próxima da biologia do vetor.

As simulações realizadas demonstraram que, na ausência de medidas de controle, ocorre rápida expansão da população infectada, seguida de redução dos casos à medida que diminui a população suscetível. Esse comportamento é compatível com modelos epidemiológicos não lineares, como o de Derouich e Boutayeb (2006).

A aplicação uniforme de $u_1 = u_2 = u_3 = 0,40$ produziu a maior supressão entre os cenários avaliados, o que é coerente com a maior intensidade imposta simultaneamente aos três componentes. O valor 0,40 deve ser interpretado como coeficiente do cenário matemático, e não como eficácia medida em campo.

O cenário combinado também reduziu os compartimentos humanos infectados e as populações vetoriais por atuar sobre prevenção humana, mosquitos adultos e fases imaturas. Sua supressão foi menos intensa que a do controle uniforme, pois u_2 e u_3 foram fixados em 0,15; ainda assim, o resultado evidencia a vantagem de integrar estratégias em relação à ausência de intervenção.

Outro aspecto relevante refere-se ao comportamento das fases imaturas do vetor. As simulações indicaram que, mesmo com a manutenção da oviposição, a redução das populações larvais e pupais diminuiu de modo expressivo a emergência de adultos. Essa observação reforça a importância da eliminação de criadouros como estratégia preventiva.

Embora os resultados obtidos apresentem comportamento biologicamente plausível, algumas limitações devem ser consideradas. O modelo adotado assume parâmetros constantes e não incorpora explicitamente fatores climáticos, heterogeneidade espacial, mobilidade populacional ou circulação simultânea dos diferentes sorotipos da dengue. Dessa forma, os cenários simulados possuem caráter exploratório e não constituem previsão quantitativa da evolução epidemiológica do município.

Apesar dessas limitações, o estudo demonstra que modelos matemáticos constituem ferramentas importantes para subsidiar decisões em saúde pública. A possibilidade de avaliar cenários de intervenção antes de sua implementação prática contribui para o planejamento de políticas públicas mais eficientes e para o uso racional de recursos destinados ao controle vetorial.

Finalmente, os resultados obtidos evidenciam que a integração entre vigilância epidemiológica, experimentação entomológica e modelagem matemática representa uma abordagem promissora para o estudo das arboviroses. Além de ampliar a compreensão dos mecanismos de transmissão da dengue, essa integração favorece o desenvolvimento de estratégias de controle fundamentadas em evidências científicas.

5 Conclusão

Este estudo integrou dados epidemiológicos de Codó–MA, observações laboratoriais de *A. aegypti* e um modelo matemático com retardo. A série de 2014 a 2023 distinguiu anos de maior notificação e confirmação, e o experimento apontou eclosão mais tardia e menor emergência de adultos nos grupos com ovos armazenados por mais tempo.

Nas simulações, a ausência de controle ampliou a transmissão, enquanto os controles simultâneos reduziram humanos infectados e populações vetoriais; o cenário uniforme de 40% produziu a maior supressão por empregar os maiores coeficientes nos três componentes. Como o modelo não foi calibrado e omite clima, mobilidade, heterogeneidade espacial e múltiplos sorotipos, os resultados são comparativos, e não previsões locais. Recomenda-se ampliar os dados e realizar calibração e análise de sensibilidade.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Saúde. *Dengue: aspectos epidemiológicos, diagnóstico e tratamento*. Brasília: MS, 2023.

DEROUICH, M.; BOUTAYEB, A. Dengue fever: Mathematical modeling and computer simulation. *Applied Mathematics and Computation*, v. 177, p. 528–544, 2006.

GUBLER, D. J. Dengue, urbanization and globalization: the unholy trinity of the 21st century. *Tropical Medicine and Health*, v. 39, n. 4, p. 3–11, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Codó (MA). Cidades e Estados. Rio de Janeiro: IBGE, [2025]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma/codo.html>. Acesso em: 13 jul. 2026.

LEANDRO, André de Souza; MACIEL-DE-FREITAS, Rafael. Development of an Integrated Surveillance System to Improve Preparedness for Arbovirus Outbreaks in a Dengue Endemic Setting: Descriptive Study. *JMIR Public Health and Surveillance*, [S. l.], v. 10, e62759, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2196/62759>. Disponível em: <https://publichealth.jmir.org/2024/1/e62759>. Acesso em: 25 jul. 2026.

LÓPEZ, Luis E.; MUÑOZ-LOAIZA, Aníbal; OLIVAR-TOST, Gerard; BETANCOURT-BETHENCOURT, José. Modelo matemático para el control de la transmisión del Dengue. *Revista de Salud Pública*, Bogotá, v. 14, n. 3, p. 512–523, 2012.

MARCONDES, C. B. *Entomologia médica e veterinária*. São Paulo: Atheneu, 2001.

SANTANA, Ana Luiza Coutinho Matos; LIMA, Guilherme Chaves. *Aedes aegypti*: ciclo de vida e arboviroses. Orientação e revisão: Danielle Barros Fortuna. Teixeira de Freitas: Universidade Federal do Sul da Bahia, Pró-Reitoria de Ações Afirmativas, 2021.

SANTOS, Nilcelane dos; SANTOS, Tamires Sousa dos. *Monitoramento do Aedes aegypti (Linnaeus 1762) e Aedes albopictus (Skuse 1895) (Diptera: Culicidae) por meio de ovitrampas em terrenos baldios da área urbana de Codó, Maranhão*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia) – Universidade Federal do Maranhão, Codó, 2022. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/6282>. Acesso em: 25 jul. 2026.

SOUSA, Wanderléia Sobrinho. *Informação estratégica sobre dengue no município de Codó, Maranhão: aspectos do potencial epidemiológico*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia) – Universidade Federal do Maranhão, Codó, 2019. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/2945>. Acesso em: 25 jul. 2026.

SOUZA, Iolanda Maria Silva de. *Infestação de Aedes spp. estimada por armadilhas de oviposição em três residenciais integrados com estratégia de controle biológico, em Codó, Maranhão*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia) – Universidade Federal do Maranhão, Codó, 2025. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/10152>. Acesso em: 25 jul. 2026.

TEIXEIRA, M. G. *et al.* Epidemiologia da dengue no Brasil: tendências e perspectivas. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 25, supl. 1, p. S7–S18, 2009.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Dengue*. Geneva: WHO, 21 Aug. 2025. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>. Acesso em: 25 jul. 2026.