

Modelo Entomológico Determinístico sob Efeito da Pluviosidade para o *Aedes aegypti* e o *Aedes albopictus*

L.S.B. SILVA^{1*}, R.T.N. CARDOSO², J.L.A. FERNANDES², C.A. SILVA³ e A.E. EIRAS⁴

Recebido em 24 de outubro de 2017 / Aceito em 2 de março de 2018

RESUMO. As espécies de mosquitos *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus* destacam-se na dispersão de diversas arboviroses, dentre elas: a dengue, a febre amarela, a febre chikungunya e o zika vírus. Trabalhos na área de Biologia Matemática vêm sendo realizados recentemente no intuito de descrever a dinâmica da população destes vetores e, conseqüentemente, auxiliar os gestores públicos no controle destas arboviroses. Neste trabalho, apresentamos um modelo entomológico para descrever o ciclo de vida destas espécies de mosquito. Os coeficientes do modelo são fixados como dependentes da pluviosidade. Os resultados do modelo são validados por confrontação com dados experimentais de capturas de fêmeas *A. aegypti* para as cidades de Caratinga e Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

Palavras-chave: Pluviosidade, *Aedes*, Modelagem.

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, observa-se um aumento do número de pessoas infectadas com gravidade variável, bem como, observa-se o aumento dos tipos de arboviroses que as acometem: quatro tipos de dengue, febre amarela, febre chikungunya e zika vírus. Uma série de esforços para desenvolvimento de vacinas e para compreender a dinâmica destes processos vem sendo empreendidos pelo mundo inteiro.

Dentre as espécies de mosquitos do gênero *Aedes* cujas fêmeas podem servir como vetores da dengue, da febre amarela, da febre chikungunya e do zika vírus, no Brasil destacam-se o *A.*

*Autor correspondente: Lillia dos Santos Barsante Silva – E-mail: lilliabarsante@gmail.com

¹Programa de Pós-graduação de Modelagem Matemática e Computacional, CEFET-MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: lilliabarsante@gmail.com

²Departamento de Física e Matemática, CEFET-MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: rodrigoc@des.cefetmg.br; acebal@dppg.cefetmg.br

³Departamento de Informática, IFMG, Instituto Federal de Minas Gerais, Rodovia MGT 262, s/n, 34590-390, Sabará, MG, Brasil. E-mail: carlos.silva@ifmg.edu.br

⁴Departamento de Parasitologia, UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: alvaro@icb.ufmg.br

aegypti (Linnaeus, 1762) e o *A. albopictus* (Skuse, 1894). O mosquito *A. albopictus* originou-se no continente asiático, onde é comumente chamado de tigre asiático. De acordo com [2], o comércio internacional de pneus usados facilitou a dispersão deste vetor na América, África, Europa Meridional, algumas ilhas no Pacífico e Havaí. O mosquito *A. aegypti* originou-se no continente africano e, provavelmente, dispersou-se para o continente americano no período colonial [15, 13]. O ciclo de vida completo destes vetores é composto pelas fases: imatura composta por ovos, larvas e pupas, seguida pela fase alada com mosquitos adultos.

Estes vetores apresentam grande capacidade de dispersão e adaptação ao meio e são encontrados em áreas urbanas, suburbanas e rurais. As regiões endêmicas estão espalhadas pelo globo, concentrando-se nas áreas tropicais e subtropicais [17]. Eles contam com potenciais criadouros naturais e artificiais distribuídos em locais do nosso cotidiano, apesar de apresentarem preferência por criadouros artificiais. Dentre os criadouros artificiais, destacamos as latas, vidros, vasos de cemitérios, pneus descartados, baldes, caixas d'água e cisternas destapados ou mal tapados. Entre os criadouros naturais destacamos as bromélias, buracos em árvores, escavação em rochas e bambu [5]. A probabilidade de dispersão passiva de ovos e larvas em potenciais criadouros do *A. aegypti* e o *A. albopictus* é maior comparada à da dispersão ativa da fase alada [6]. A dispersão passiva está relacionada a diversos fatores sociais e ambientais, tais como: inexistência de controle específico, condições ambientais favoráveis como temperatura, pluviosidade e umidade, bem como, saneamento básico precário [14]. Dentre as variáveis meteorológicas, destacamos a pluviosidade que influencia a quantidade de criadouros potenciais disponíveis para o desenvolvimento da fase imatura e gera condições ideais para o desenvolvimento de sua fase alada [10]. O excesso de chuva poderá eliminar as fases imaturas de potenciais criadouros e desta forma, impactar na mortalidade do vetor [8]. No período de escassez de chuvas, entretanto, não há desaparecimento do vetor, devido à prática de armazenamento de água em recipientes abertos [12].

A fim de conferir capacidade preditiva e universalidade, iremos neste trabalho apresentar um modelo matemático para as populações dos estágios de desenvolvimento do *A. aegypti* e o *A. albopictus* de forma que os parâmetros entomológicos sejam dependentes da pluviosidade. Para validar a capacidade preditiva do modelo, seus resultados são comparados com dados experimentais de capturas de fêmeas expressos pelo indicador entomológico chamado *Índice Médio de Fêmeas Aedes - IMFA*. As comparações são realizadas para as cidades de Caratinga e Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste trabalho abordamos uma variação de modelo entomológico com dependência da pluviosidade cujo termo não linear explicitava a preferência da fêmea no sentido de não depositar seus ovos em criadouros com população de ovos populosa [1]. Nesta versão, considera-se que a fêmea evite ovipor em criadouros tais que toda a fase imatura, composta por ovos, pupas e larvas estejam populosas [9].

As variáveis de estado deste sistema em função do tempo são representadas por $\vec{X}(t) = (E(t), A(t), F_1(t), F_2(t))$, onde $E(t)$ representa a população de ovos, $A(t)$ representa a população aquática (larvas e pupas), $F_1(t)$ representa a população de fêmeas pré-repasto sanguíneo e $F_2(t)$ representa a população de fêmeas pós-repasto sanguíneo do *A. aegypti* e do *A. albopictus*. O modelo está constituído de modo que seus parâmetros sejam dependentes da pluviosidade semanalmente acumulada $P(t)$. A dinâmica compartimental que representa o ciclo entomológico destes mosquitos está representada na Figura 1.

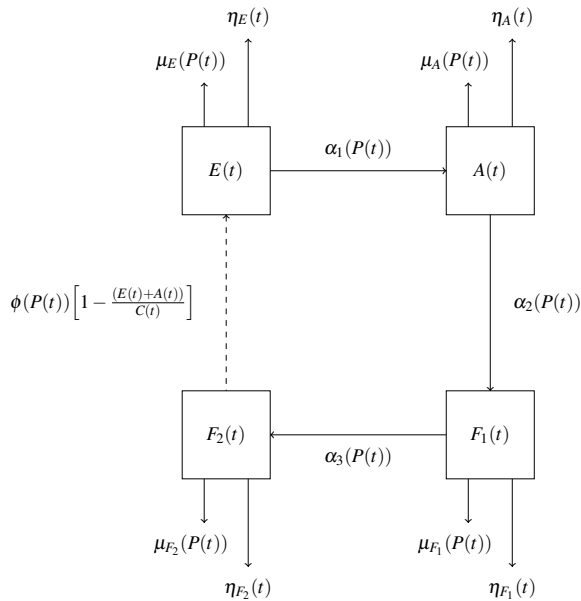


Figura 1: Diagrama ilustrando a dinâmica das populações do ciclo de vida do *Aedes aegypti* e do *Aedes albopictus* diante da variação da pluviosidade.

Dessa forma, o modelo entomológico é dado pelo sistema não-autônomo de equações diferenciais não lineares com dependência da pluviosidade:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \phi(P(t)) \left[1 - \frac{E(t)+A(t)}{C(t)} \right] F_2(t) - (\alpha_1(P(t)) + \mu_E(P(t)) + \eta_E(t))E(t), \\ \frac{dA}{dt} &= \alpha_1(P(t))E(t) - (\alpha_2(P(t)) + \mu_A(P(t)) + \eta_A(t))A(t), \\ \frac{dF_1}{dt} &= \alpha_2(P(t))A(t) - (\alpha_3(P(t)) + \mu_{F_1}(P(t)) + \eta_{F_1}(t))F_1(t), \\ \frac{dF_2}{dt} &= \alpha_3(P(t))F_1(t) - (\mu_{F_2}(P(t)) + \eta_{F_2}(t))F_2(t). \end{aligned} \right. \tag{2.1}$$

A região do sistema (2.1) com sentido biológico é definida por

$$\Gamma = \{(E, A, F_1, F_2) \in \mathbb{R}^4 : E, A, F_1, F_2 \geq 0 \text{ e } 0 \leq E + A \leq C\},$$

ou seja, todas as populações do sistema são não negativas e a população da fase imatura não excede a capacidade do meio.

A população de fêmeas pós-repasto sanguíneo $F_2(t)$ contribui depositando seus ovos em potenciais criadouros a uma taxa intrínseca de oviposição por unidade de indivíduo dada por $\phi(P(t)) \left[1 - \frac{E(t)+A(t)}{C(t)}\right]$. O termo entre colchetes nesta expressão constitui um fator logístico que atenua $\phi(P(t))$, caso a população da fase imatura (ovos, larvas e pupas) do mosquito seja suficientemente grande comparada com o valor de $C(t)$ que representa a capacidade do meio associada a abundância de nutrientes, espaço, dentre outros. As taxas de desenvolvimento dos mosquitos são dados por: $\alpha_1(P(t))$ - ovos para aquática, $\alpha_2(P(t))$ - aquática para fêmeas pré-repasto sanguíneo, e $\alpha_3(P(t))$ - fêmeas pré-repasto sanguíneo para fêmeas pós-repasto sanguíneo; e as taxas de mortalidade natural e adicional por unidade de indivíduo específica de cada compartimento são dadas por $\mu(P(t))$ e $\eta(t)$, respectivamente.

A população do ciclo de vida do *A. aegypti* e do *A. albopictus* apresentam uma forte sensibilidade à presença de pouca pluviosidade, produzindo relativamente muitos indivíduos. Contudo, para maiores quantidades de pluviosidade, a resposta da população não guarda a mesma sensibilidade. A modelagem proposta para representar a dependência dos parâmetros entomológicos do sistema (2.1) com a pluviosidade foi baseada via leis de potência:

$$\pi = \pi_{min} + \frac{(\pi_{max} - \pi_{min})}{(P_1^* - P_0)^{r_\pi}} (P - P_0)^{r_\pi}, \quad (2.2)$$

em que π representa genericamente os parâmetros entomológicos ϕ , α_1 , α_2 e α_3 do sistema (2.1); π_{min} e π_{max} representam, respectivamente, o valor mínimo e o valor máximo do parâmetro; P representa a pluviosidade acumulada em cada semana; P_0 e P_1 representam, respectivamente, o valor mínimo e o valor máximo da pluviosidade da cidade em estudo; $r_\pi \in [0 \ 1]$.

Para os demais parâmetros entomológicos do modelo foi adotada uma dependência linear com a pluviosidade acumulada semanalmente ao longo de todo horizonte de estudo.

3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

O sistema (2.1) é não autônomo, uma vez que os seus coeficientes dependem da pluviosidade de uma determinada área, que, por sua vez, depende do tempo. Este sistema será implementado de modo que as populações se atualizem em escala de horas e a pluviosidade acumulada é apresentada semanalmente de forma compatível às semanas epidemiológicas. Consequentemente, a cada semana, um valor de pluviosidade média é fixado e, dentro deste período, o comportamento do modelo se dá de forma autônoma. Portanto, com a atualização semanal da pluviosidade média, o modelo se comporta como uma sucessão de modelos autônomos. Desta forma, tomando os

parâmetros do sistema (2.1) invariantes no tempo, pode-se identificar um ponto de equilíbrio trivial X_0 e o ponto de equilíbrio não trivial X_1 , dados por:

$$X_0 = (E^*, A^*, F_1^*, F_2^*) = (0, 0, 0, 0) \text{ e } X_1 = (E^{**}, A^{**}, F_1^{**}, F_2^{**}),$$

em que

$$E^{**} = \frac{(\alpha_2 + \mu_A + \eta_A)}{[\alpha_1 + (\alpha_2 + \mu_A + \eta_A)]} C \left(1 - \frac{1}{Q_0}\right); A^{**} = \frac{\alpha_1}{(\alpha_2 + \mu_A + \eta_A)} E^{**};$$

$$F_1^{**} = \frac{\alpha_2}{(\alpha_3 + \mu_{F_1} + \eta_{F_1})} A^{**}; F_2^{**} = \frac{\alpha_3}{(\mu_{F_2} + \eta_{F_2})} F_1^{**};$$

e o número de descendentes basal Q_0 é definido por

$$Q_0 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \phi}{(\alpha_1 + \mu_E + \eta_E)(\alpha_2 + \mu_A + \eta_A)(\alpha_3 + \mu_{F_1} + \eta_{F_1})(\mu_{F_2} + \eta_{F_2})}. \tag{3.1}$$

O número de descendentes basal Q_0 , dado pela equação (3.1), determina o nível de infestação do vetor, ou seja, representa o número médio de fêmeas da prole de uma única fêmea pós-repasto sanguíneo que atingem a vida adulta. Biologicamente, o Q_0 pode ser interpretado como o produto da fração da população de ovos que sobrevivem e eclodem na população aquática $\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \mu_E + \eta_E}\right)$, a fração da população aquática que sobrevivem e emergem para população de fêmea pré-repasto sanguíneo $\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \mu_A + \eta_A}\right)$, a fração da população de fêmeas pré-repasto sanguíneo que sobrevivem e se tornam fêmea pós-repasto sanguíneo $\left(\frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \mu_{F_1} + \eta_{F_1}}\right)$ e a fração de ovos viáveis gerados durante a sua sobrevida da população de fêmea pós-repasto sanguíneo $\left(\frac{\phi}{\mu_{F_2} + \eta_{F_2}}\right)$.

O ponto de equilíbrio X_1 terá significado biológico apenas se $Q_0 \geq 1$ e será biologicamente trivial se considerarmos $Q_0 = 1$, de modo que $X_1 = X_0$. Utilizando os critérios de Routh-Hurwitz, verifica-se que para $0 < Q_0 < 1$, existe um ponto de equilíbrio estável em X_0 e um ponto de equilíbrio instável em X_1 . A medida que $Q_0 \rightarrow 1$, o ponto de equilíbrio instável se aproxima do ponto de equilíbrio estável e $Q_0 = 1$ corresponde a um ponto de bifurcação transcritical do sistema dinâmico. Finalmente, quando $Q_0 > 1$, X_0 se torna instável, e X_1 estável.

4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE Q_0

É importante descobrir quais parâmetros têm alto impacto sobre o número de descendentes basal Q_0 , pois uma pequena variação em um parâmetro altamente sensível resultará em grandes mudanças quantitativas do sistema (2.1) e estes parâmetros devem ser alvos de estratégias de ações de controle.

Para realizar a análise de sensibilidade local em Q_0 em relação a um parâmetro π , utilizamos o índice de sensibilidade normalizado, denotado por $\Phi_{\pi}^{Q_0}$. Este índice foi definido por [3, 4] como

$$\Phi_{\pi}^{Q_0} = \frac{\partial Q_0}{\partial \pi} \frac{\pi}{Q_0}.$$

A Tabela 1 ilustra uma expressão analítica para análise de sensibilidade normalizada de Q_0 em relação a cada parâmetro na expressão (3.1). Verifica-se que as taxas de mortalidade estão correlacionadas negativamente a Q_0 , enquanto que ϕ e as taxas de desenvolvimento estão correlacionadas positivamente. Os dois parâmetros que mais afetam a dinâmica do sistema (2.1) em relação a Q_0 , são a taxa intrínseca de oviposição (ϕ) e a taxa de mortalidade natural de fêmeas pós-repasto sanguíneo (μ_{F_2}). Por exemplo, se μ_{F_2} é aumentado (ou diminuído) em 5%, então, Q_0 diminui (ou aumenta) também em 5%. Impacto oposto sofre Q_0 , se variarmos ϕ . Por exemplo, se ϕ é aumentado (ou diminuído) em 5%, então, Q_0 aumenta (ou diminui) também em 5%. Desta forma, implementação de ações de controle adicionais que reduz ϕ e aumenta μ_{F_2} , poderá minimizar significativamente a presença de vetores no ambiente.

Tabela 1: Análise de sensibilidade normalizada em relação a cada parâmetro adotado no sistema (2.1) em relação ao número de descendentes basal Q_0 . Não foi considerada ações de controle adicionais ($\eta_E = \eta_A = \eta_{F_1} = \eta_{F_2} = 0$).

Parâmetro	Sensibilidade	Parâmetro	Sensibilidade
ϕ	+1	μ_E	$-\frac{\mu_E}{\alpha_1 + \mu_E} \in (-1,0)$
α_1	$\frac{\mu_E}{\alpha_1 + \mu_E} \in (0,1)$	μ_A	$-\frac{\mu_A}{\alpha_2 + \mu_A} \in (-1,0)$
α_2	$\frac{\mu_A}{\alpha_2 + \mu_A} \in (0,1)$	μ_{F_1}	$-\frac{\mu_{F_1}}{\alpha_3 + \mu_{F_1}} \in (-1,0)$
α_3	$\frac{\mu_{F_1}}{\alpha_3 + \mu_{F_1}} \in (0,1)$	μ_{F_2}	-1

5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O sistema (2.1) foi resolvido numericamente através do algoritmo de Runge-Kutta de quarta ordem, com passo de 0,01, utilizando o *software* MATLAB[®] 7.12.0 (R2011a) em um computador Intel(R) Core(TM) i5 2,5 GHz com 4GB de memória RAM.

Por se tratar de uma padronização internacional, a escala temporal deste sistema foi dada em unidades da semana epidemiológica no horizonte de estudo. Adotamos as coordenadas do ponto de equilíbrio não trivial da primeira semana epidemiológica como valor de condição inicial do sistema (2.1).

Os valores máximos e mínimos dos coeficientes entomológicos deste sistema são mostrados na Tabela 2, cuja unidade é dada por dias^{-1} . O parâmetro ϕ_{min} foi obtido de [16]; ϕ_{max} foi obtido de [11]; μ_A foi obtido de [7]; α_1 , α_2 , μ_E , μ_{F_1} e μ_{F_2} foram obtidos de [18]; C e α_3 foram estimados por especialistas da área biológica. Não foram aplicadas ações de controle adicionais ($\eta_E = \eta_A = \eta_{F_1} = \eta_{F_2} = 0$) ao longo do horizonte de estudo.

Tabela 2: Faixa de parâmetros adotados no sistema (2.1).

Parâmetro	Faixa	Parâmetro	Faixa
ϕ	0,5 – 11,2	μ_A	0,164 – 0,132
C	1	μ_E	0,01
α_1	0,2 – 0,5	$\mu_{F_1} = \mu_{F_2}$	0,0588 – 0,0286
α_2	0,0385 – 0,1670	α_3	0,5 – 1,0

As Figuras 2 - 5 ilustram a evolução das populações do *Aedes* do sistema (2.1) ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte referentes às semanas epidemiológicas 23 – 52 do ano de 2009 e 1 – 51 do ano de 2010 para a cidade de Caratinga (Minas Gerais, Brasil). As Figuras 6 - 9 ilustram a evolução das populações do *Aedes* do sistema (2.1) ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte referentes às semanas epidemiológicas 12 – 52 do ano de 2009 e 1 – 52 do ano de 2010 para a cidade de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil), sendo que o valor referente ao dado de monitoramento entomológico da semana epidemiológica 52 do ano de 2009 foi obtido via interpolação linear. Nesta interpolação foram adotados os valores dos dados de monitoramento entomológico das semanas epidemiológicas 51 do ano de 2009 e 1 do ano de 2010. Em ambas as cidades podem-se observar que uma pequena variação na pluviosidade acumulada semanalmente é o suficiente para manter a população $E(t)$ elevada, em média, nas próximas duas semanas. Ocorrem coincidências entre os picos das populações $A(t)$ e $F_1(t)$ com os índices pluviométricos, evidenciando a influência desta variável climática na dinâmica das populações do ciclo de vida do *A. aegypti* e do *A. albopictus*. A população $F_2(t)$ acompanha os índices pluviométricos com um atraso médio de uma a duas semanas epidemiológicas. Nos longos períodos de seca, todas as populações sofrem um decaimento significativo, mas não extinguem. Este fato pode estar ligado à presença de potenciais criadouros destes vetores neste período.

Na validação do sistema (2.1) foi realizada uma comparação entre a evolução da população de fêmeas pós-repasto sanguíneo $F_2(t)$ e dados amostrais de *IMFA* no horizonte de estudo das duas cidades. Esta comparação foi restrita a população de fêmeas pós-repasto sanguíneo, uma vez que a maioria das fêmeas capturadas pelas armadilhas MosquiTRAPs[®] estão em fase de oviposição. Os dados amostrais de *IMFA* foram monitorados pelo MI-Dengue (Ecovec SA) por meio das armadilhas MosquiTRAPs[®]. Este índice corresponde à razão entre o número de fêmeas *Aedes* em fase de oviposição capturadas pela armadilha MosquiTRAP[®] e o número total de armadilhas instaladas na região de estudo. Com intuito de comparar a área entre as curvas foi feito um ajuste pelo método dos mínimos quadrados, resultando o melhor ajuste em $r = 0,8$ para os parâmetros

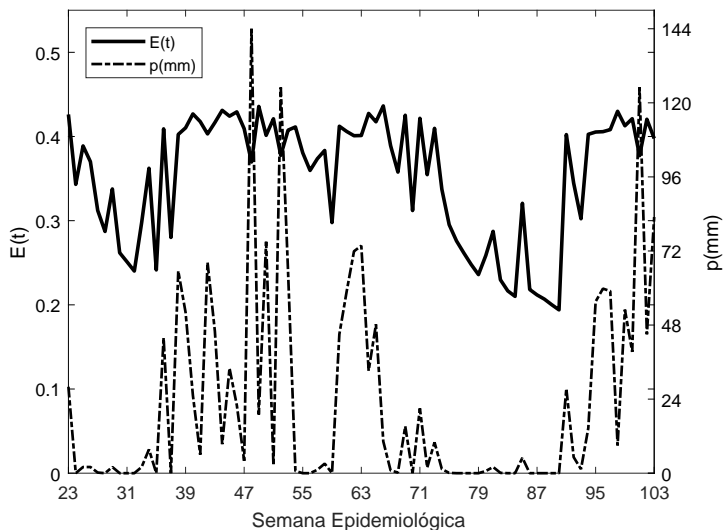


Figura 2: Evolução da população de ovos dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Caratinga (Minas Gerais, Brasil).

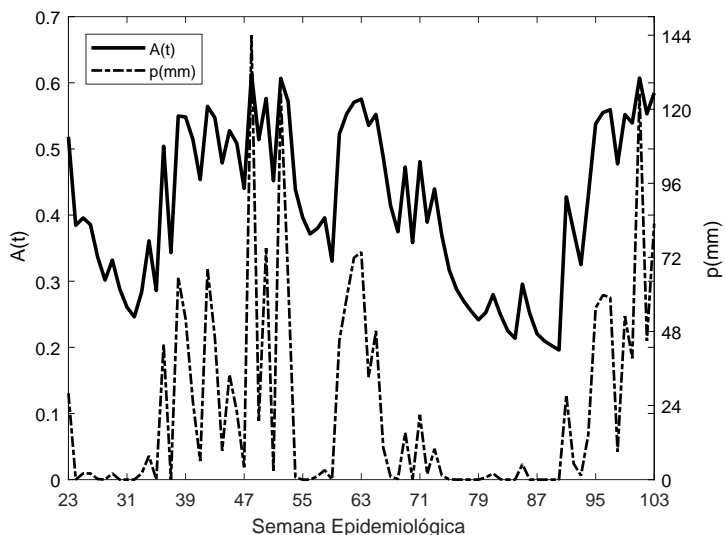


Figura 3: Evolução da população aquática dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Caratinga (Minas Gerais, Brasil).

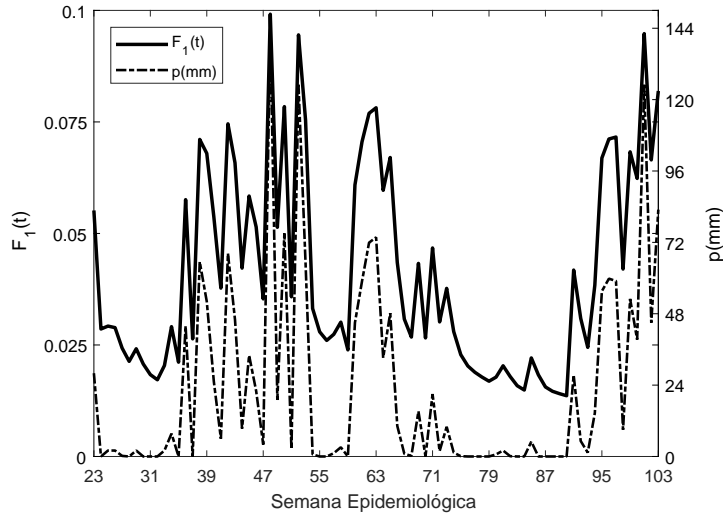


Figura 4: Evolução da população de fêmeas pré-repasto sanguíneo dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Caratinga (Minas Gerais, Brasil).

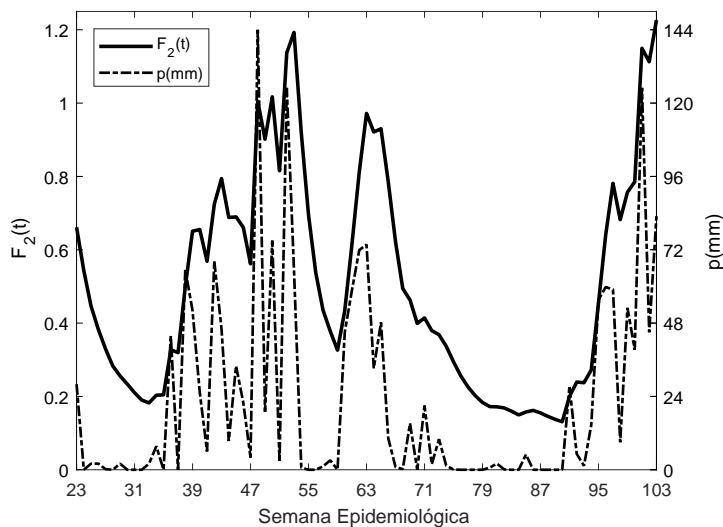


Figura 5: Evolução da população de fêmeas pós-repasto sanguíneo dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Caratinga (Minas Gerais, Brasil).

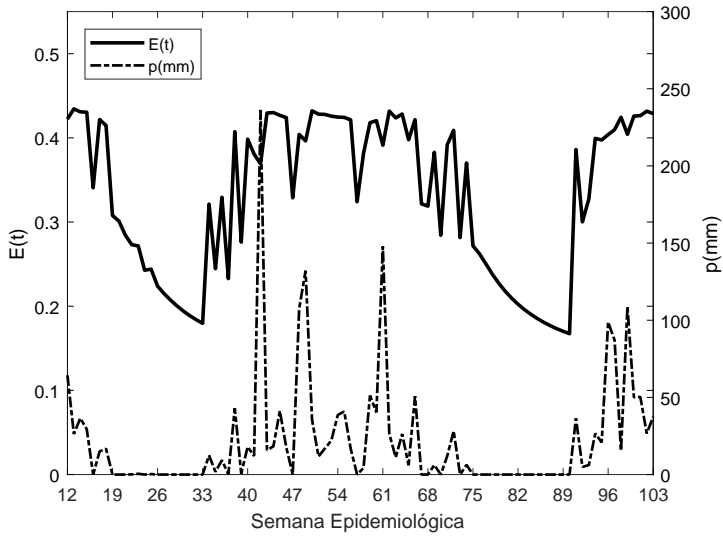


Figura 6: Evolução da população de ovos dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil).

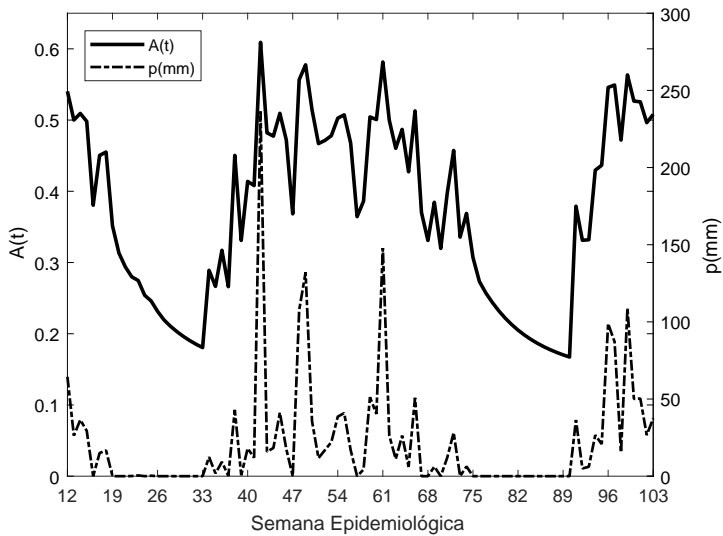


Figura 7: Evolução da população aquática dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil).

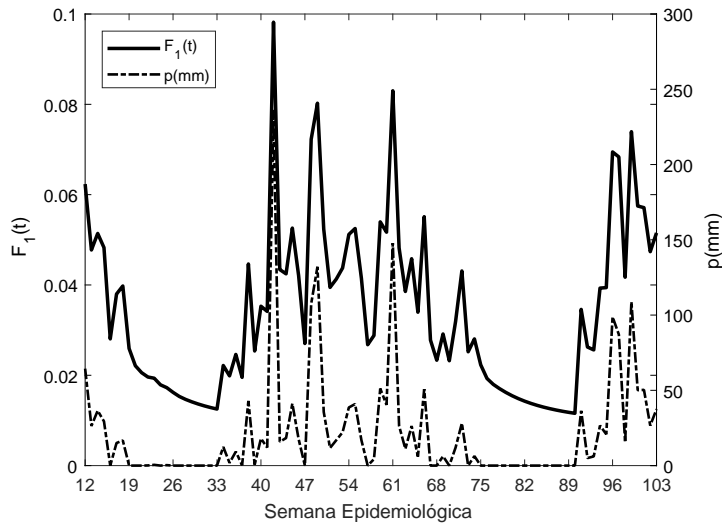


Figura 8: Evolução da população de fêmeas pré-repasto sanguíneo dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil).

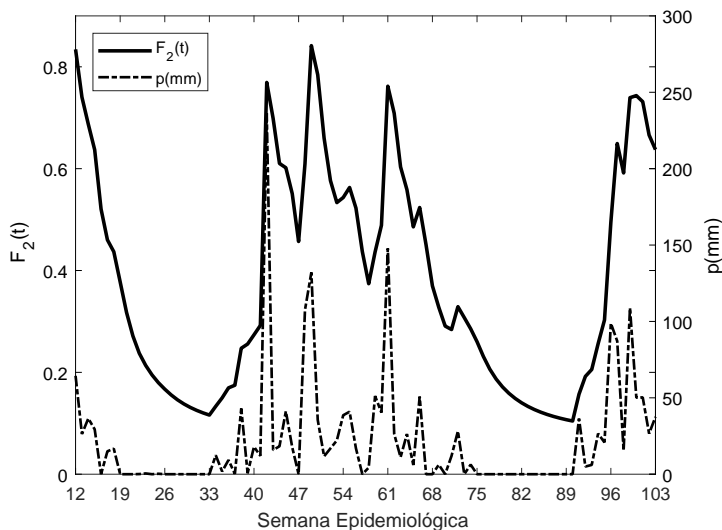


Figura 9: Evolução da população de fêmeas pós-repasto sanguíneo dos mosquitos ao longo da variação da pluviosidade acumulada semanalmente no horizonte de estudo da cidade de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil).

$(\phi, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ na equação (2.2). Nesta comparação foi feita uma correlação cruzada entre os dados de *IMFA* e $F_2(t)$, onde definimos as novas populações *imfa* e $f_2(t)$. Buscando coincidir o maior número de picos entre as curvas, foi aplicado um fator de escala λ em $f_2(t)$, dado por

$$\lambda = \frac{\int_0^N [f_2(t)(I(t))^2] dt}{\int_0^N [I(t)(f_2(t))^2] dt},$$

em que $I(t)$ corresponde aos dados de *imfa* e N é o número de semanas epidemiológicas da cidade em estudo.

As Figuras 10 - 11 ilustram durante o horizonte de estudo que a população de fêmeas pós-repasto sanguíneo acompanha os dados amostrais de *IMFA* com um atraso médio entre os picos e os vales de duas semanas para a cidade de Caratinga (Minas Gerais, Brasil) e de três semanas para a cidade de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil). Esta validação pode ser considerada satisfatória, uma vez que abordamos o efeito do tipo logístico da população de ovos sobre a inibição da probabilidade de oviposição em criadouros populosos tanto pela população de ovos quanto pela população aquática (larvas e pupas) e desconsideramos a influência do controle e de outros fatores climáticos, como temperatura, umidade relativa do ar e altitude na dinâmica do modelo (2.1). Além disso, devemos ressaltar que os dados amostrais de captura podem sofrer influência de diversas formas, como tecnológicas, humanas e climáticas.

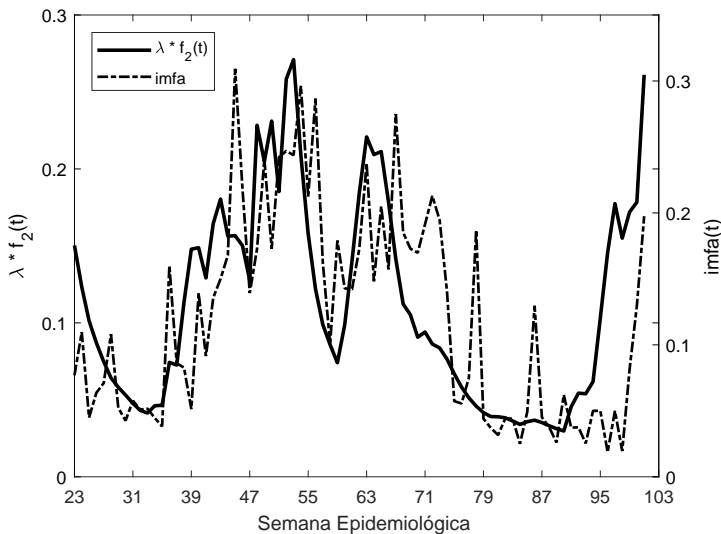


Figura 10: Comparação entre o Índice Médio de Fêmeas Aedes e a população de fêmeas pós-repasto sanguíneo, após correlação e fator de escala, no horizonte de estudo das cidades de Caratinga (Minas Gerais, Brasil).

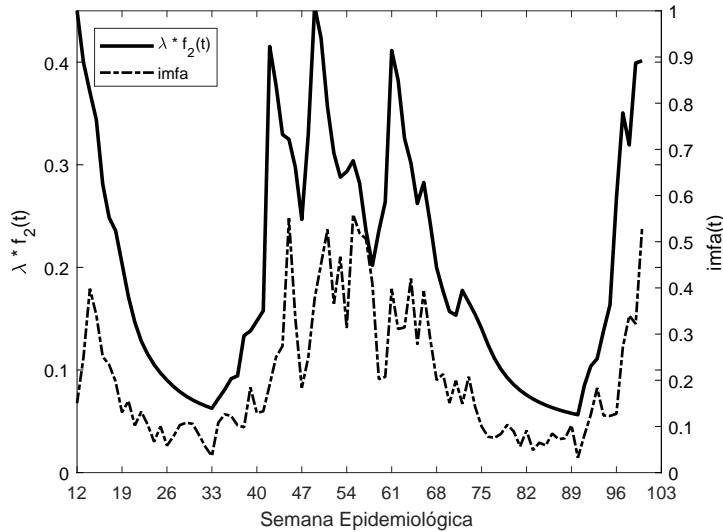


Figura 11: Comparação entre o Índice Médio de Fêmeas *Aedes* e a população de fêmeas pós-repasto sanguíneo, após correlação e fator de escala, no horizonte de estudo das cidades de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil).

6 CONCLUSÃO

Diante da necessidade de se aperfeiçoar o conhecimento do ciclo de vida do *A. aegypti* e do *A. albopictus* e a fim de promover contribuições às metodologias de controle destes vetores por parte dos gestores públicos, propomos neste trabalho um modelo entomológico derivado da literatura cuja dinâmica é apresentada computacionalmente via simulações numéricas. A validação deste sistema pode ser considerada aceitável, principalmente no horizonte chuvoso como pode ser constatado pela proximidade entre a população de fêmeas pós-repasto sanguíneo e dados amostrais de *IMFA* ao longo do horizonte de estudo. Desta forma, de posse de dados de previsão futura de pluviosidade de uma determinada área, acreditamos que este sistema poderá ser amplamente explorado e portanto, poderá auxiliar no controle de todo ciclo de vida destes vetores.

AGRADECIMENTOS

Trabalho financiado pela CAPES e apresentado no XXXVI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional.

ABSTRACT. The mosquito species *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* are prominent in the dispersal of several arboviruses, among them: dengue fever, yellow fever, chikungunya fever and zika virus. Recent works in the area of mathematical biology have been carried out in order to describe the dynamics of the population of these vectors and, consequently, to help public managers in the control of these arboviruses. In this work, we present an entomological model to describe the life cycle of those species of mosquitoes. The coefficients

of the model are fixed as rainfall dependent. The results of the model are validated by comparison to field data of captures of females *A. aegypti* performed in the cities of Caratinga and Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil.

Keywords: Rainfall, *Aedes*, Modeling.

REFERÊNCIAS

- [1] L.S. Barsante. “Dependência entre pluviosidade e população de fêmeas *Aedes aegypti* grávidas descritas através de um sistema dinâmico não linear”. Master’s thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG (2012).
- [2] S.M.A.A. Borges. “Importância epidemiológica do *Aedes albopictus* nas Américas”. Master’s thesis, Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP (2001).
- [3] J. Cariboni, D. Gatelli, R. Liska & A. Saltelli. The role of sensitivity analysis in ecological modelling. *Ecological Modelling*, **203** (2007), 167–182.
- [4] N. Chitnis, J.M. Hyman & J.M. Cushing. Determining Important Parameters in the spread of Malaria through the Sensitivity analysis of a mathematical model. *Bulletin of Mathematical Biology*, **70** (2008), 1272–1296.
- [5] R.A.G.B. Consoli & R.L. Oliveira. “Principais mosquitos de importância sanitária no Brasil”. Fiocruz (1994).
- [6] M.A.R. Costa. “A ocorrência do *Aedes aegypti* na região noroeste do Paraná: um estudo sobre a epidemia da dengue em Paranavaí - 1999, na perspectiva da geografia médica”. Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo, SP (2001).
- [7] C.P. Ferreira & H.M. Yang. Estudo da transmissão da dengue entre os indivíduos em interação com a população de mosquitos *Aedes aegypti*. *Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, **4**(3) (2003), 323–332.
- [8] C.J.M. Koenraadt & L.C. Harrington. Flushing effect of rain on container inhabiting mosquitoes *Aedes aegypti* and *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae). *J. Med. Entomol.*, **45**(1) (2008), 28–35.
- [9] J.F.A. Montoya, A.M. Loaiza & C.A.A. Muñoz. Population Dynamics of *Aedes aegypti* Considering Quiescence. *Applied Mathematical Sciences*, **9**(74) (2015), 3659–3668.
- [10] V.S.G. Neto & J.M.M. Rebêlo. Aspectos epidemiológicos do dengue no município de São Luís, Maranhão, Brasil, 1997-2002. *Cad. Saúde Pública*, **20**(5) (2004), 1424–1431.
- [11] S.T.R. Pinho, C.P. Ferreira, L. Esteva, F.R. Barreto, V.C.M. e Silva & M.G.L. Teixeira. Modelling the dynamics of dengue real epidemics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **368**(1933) (2010), 5679–5693.
- [12] R.J.S. Pontes, J. Freeman, J.W.O. Lima, C. Hodgson & A. Spielman. Vector densities that potentiate dengue outbreaks in a Brazilian city. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, **62**(3) (2000), 378–383.

- [13] H.H.G. Silva & I.G. Silva. Influência do período de quiescência dos ovos sobre o ciclo de vida de *Aedes aegypti* (Linnaeus, 1762) (Diptera: Culicidae) em condições de laboratório. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, **32**(4) (1999), 349–355.
- [14] H.H.G. Silva & I.G. Silva. Estudo do ciclo evolutivo do *Aedes aegypti* (Linnaeus, 1762) (Diptera: Culicidae) a partir de ovos com quatro meses de estocagem em laboratório. *Rev. Pat. Trop.*, **29**(1) (2000), 95–100.
- [15] I.G. Silva, M.F. Camargo, F.L. Guimarães, M. Elias & A.W.S. Oliveira. Estudo da eficácia da deltametrina (k-othrine ubv 0,4% e 1%) no combate ao *Aedes* (*Stegomyia*) *aegypti* (Linnaeus, 1762) e ao *Culex quiquefasciatus* (Wiedmann, 1828) (Diptera: Culicidae). *Rev. Pat. Trop.*, **22**(1) (1993), 49–56.
- [16] R.C.A. Thomé. “Controle ótimo aplicado na estratégia de combate ao *Aedes aegypti* utilizando inseticida e mosquitos estéreis”. Ph.D. thesis, Universidade de Campinas, São Paulo, SP (2007).
- [17] M.A. Tolle. Mosquito-borne diseases. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*, **39**(4) (2009), 97–140.
- [18] H.M. Yang & C.P. Ferreira. Assessing the effects of vector control on dengue transmission. *Applied Mathematics and Computation*, **198** (2008), 401–413.