

Análise Epidemiológica da pandemia de COVID-19 em Cametá durante o ano de 2021

Sandro Willian Viana Brito¹
Universidade Federal do Pará

Dr. Júlio Roberto Soares da Silva²
Universidade Federal do Pará

RESUMO

Na pandemia de COVID-19, a rápida disseminação do Coronavírus torna desafiador entender sua evolução. A modelagem matemática é essencial para estudos epidemiológicos. Neste artigo, abordamos um estudo de caso do tipo ex-post-facto em 2021 no município de Cametá, Pará, usando modelos SIR, SIRS e Verhulst. Com dados reais, ajustamos curvas usando o modelo logístico para casos confirmados e recuperados, e estimamos parâmetros dos modelos SIR e SIRS. Essa abordagem possibilitou simulações numéricas, compreendendo aspectos como taxa de reprodução, incidência, transmissão, casos e picos. Isso contribui para entender o impacto local da pandemia, orientando estratégias de saúde pública e controle do vírus.

Palavras-chave: COVID-19; Modelagem matemática; SIR; SIRS; Modelo de Verhulst.

INTRODUÇÃO

A pandemia de COVID-19 é reconhecida como uma das mais significativas crises de saúde pública na contemporaneidade, surgindo a partir da disseminação do novo coronavírus (SARS-CoV-2). Essa doença respiratória aguda demonstra um alto grau de gravidade e se destaca pela sua capacidade de transmissão em escala global. Segundo dados fornecidos pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2023), o Brasil tem registrado um número expressivo de casos e óbitos relacionados à COVID-19. Até a data de 26 de maio de 2023, aproximadamente 37.579.028 casos e 702.664 óbitos foram confirmados em todo o país. Entre esses números alarmantes, merece destaque o Estado do Pará, que contribui de maneira significativa para as estatísticas, apresentando 880.105 casos confirmados e 19.113 óbitos. Essas estatísticas ressaltam a necessidade premente de adoção de medidas efetivas para controlar a propagação do vírus e mitigar os impactos da pandemia, em especial no município de Cametá. Nesse contexto, surge a necessidade de fornecer subsídios para auxiliar no entendimento da pandemia. Para isso, neste trabalho utilizaremos dois modelos importantes: o modelo de

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0795-7606>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3057151676502271>. E-mail: caprinlife@gmail.com.

² Universidade Federal do Pará (UFPA). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2636-0050>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1449991706012638>. E-mail: julioroberto@ufpa.br.

Verhulst e os modelos epidemiológico SIR (Suscetíveis-Infetados-Recuperados) e SIRS (Suscetíveis-Infetados-Recuperados-Suscetíveis). Tais modelos matemáticos têm sido amplamente aplicados no estudo do crescimento populacional e no acompanhamento de doenças infecciosas, como a COVID-19. Eles nos permitem analisar o comportamento da epidemia ao longo do tempo, identificando, por exemplo, pontos de inflexão, picos de casos e tendências de estabilização. Essa abordagem matemática é essencial para embasar decisões estratégicas de controle e prevenção da disseminação do vírus, contribuindo para a proteção da saúde pública.

MÉTODOS

Este estudo, conduzido de forma qualitativa e quantitativa, utiliza a metodologia de estudo de caso e pesquisa ex-post-facto. Inicialmente, uma revisão bibliográfica definiu os dados necessários e o modelo de Verhulst para a pesquisa. Entre 14/01/2021 e 03/09/2021, dados foram coletados do centro de imunização e Secretaria de Saúde Municipal de Cametá, incluindo boletins epidemiológicos, planilhas de testes rápidos e dados sobre a campanha de vacinação. Usando Python, o modelo de Verhulst foi ajustado aos dados coletados, permitindo a simulação numérica, plotagem de gráficos e estimativa de parâmetros para os modelos epidemiológicos SIR e SIRS. Os resultados foram então descritos e discutidos por meio da avaliação quantitativa e qualitativa de equações, tabelas e gráficos. As informações foram compiladas e avaliadas durante a construção do artigo.

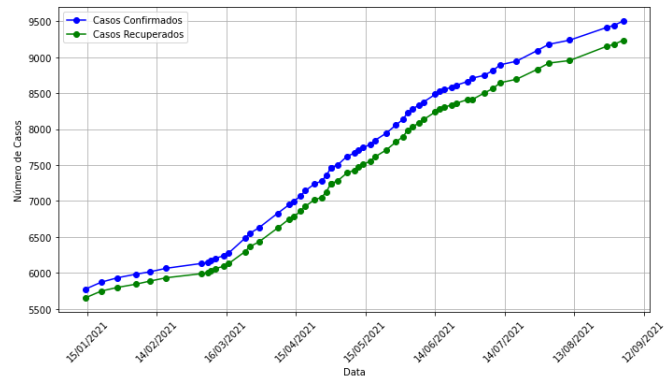
RESULTADOS

Perfil epidemiológico de Cametá no ano de 2021.

Cametá, até a data de 14/01/2021, apresentou um total de 5.774 casos acumulados de COVID-19 e 122 óbitos acumulados. A taxa de letalidade, que é a proporção de óbitos em relação ao total de casos, foi registrada em 2,1% de acordo com o Plano Municipal de Vacinação (PMV/COVID-19) de Cametá (CAMETÁ, 2021). Além disso, a incidência, medida pela quantidade de casos por 1000 habitantes, foi de 43,05. A coleta de dados foi realizada com boletins do período de 14/01/2021 até 03/09/2021, através de boletins epidemiológicos disponíveis na aba de transparência do site oficial do município, além de consultas feitas ao Centro de Imunização e Secretaria de Saúde de Cametá entre as datas 05/07/2023 e 14/07/2023. Nesse intervalo, a disponibilidade de boletins epidemiológicos não sofreu interrupção, garantindo a continuidade das informações. Os dados obtidos pelo

boletim resultam nos seguintes gráficos de confirmados e recuperado que acompanham a evolução no numero de casos.

Figura 1 - Gráfico dos casos registrados de confirmados e recuperados da Covid-19 em Cameté no ano de 2021.



Fonte: Compilação do autor.

Nota-se que para tal gráfico seria adequado utilizar um modelo que no principio evoluísse de forma exponencial, mas que após certo momento apresentasse diminuição no aumento de casos diários devidos as intervenções feitas pelo governo daquele ano. Nesse contexto, o modelo de Verhulst se torna adequado para fazer estimativas a cerca do numero de casos confirmados e recuperados acumulados ao longo do ano.

Aplicação do modelo Verhulst aos dados epidemiológicos de Cameté: Ajuste de Curva

Utilizamos a linguagem de programação Python e suas bibliotecas, como *NumPy* e *Matplotlib*, para ajustar o modelo Verhulst aos dados do boletim epidemiológico de Cameté durante o ano de 2021. Seleccionamos 11 boletins para cobrir todo o período do ano. O objetivo foi realizar o ajuste de curva necessário para analisar a evolução da COVID-19 na cidade. Através dessas ferramentas, conseguimos simular e otimizar os parâmetros do modelo, permitindo uma análise mais detalhada da dinâmica da epidemia no município. O modelo retorna os parâmetros ajustados do modelo:

$$r = 1.166151005122722; k = 0.006598424398333956; L = 11899.20367418086$$

A equação do modelo de Verhulst com os parâmetros ajustados r , k e L fica da seguinte forma:

$$P(t) = \frac{11899.20367418086}{1 + 1.166151005122722 \cdot e^{-0.006598424398333956 \cdot t}} \quad (1)$$

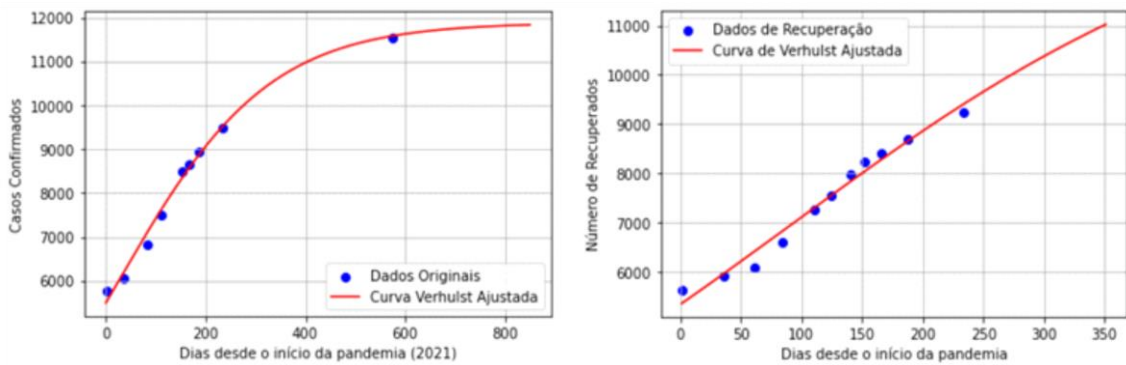
Dessa forma exibimos o gráfico do modelo logístico $P(t)$ para o ano de 2021 ajustados aos casos reais de Confirmados no período de 14/01/2021 a 03/09/2021 que correspondem aos dias 01 e 351 respectivamente do gráfico. Partindo do mesmo principio também poderemos ajustar o modelo Verhulst aos números de recuperados ao longo do mesmo período. Com os parâmetros ajustados:

$$r = 1.5887063902440293; k = 0.005183827984873823; L = 13860.449171234231$$

Obtemos a seguinte curva:

$$R(t) = \frac{13860.449171234231}{1 + 1.5887063902440293 \cdot e^{-0.005183827984873823 \cdot t}} \quad (2)$$

Figura 2 - Curvas ajustadas aos casos confirmados e aos casos recuperados em 2021 via Modelo de Verhulst.



Fonte: Compilação do autor.

Considerando o modelo logístico, o crescimento diário, isto é, o número de novos casos a cada dia pode ser expresso por:

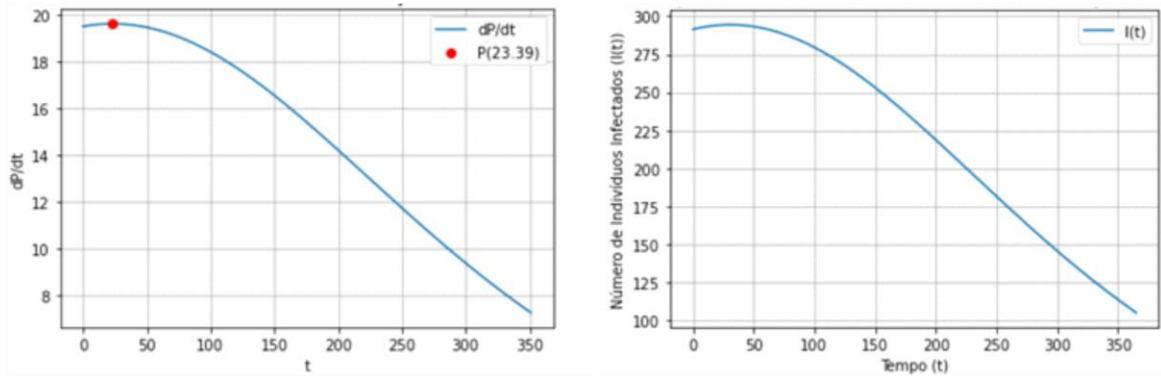
$$C(t) = \int_t^{t+1} \frac{dP(t)}{dt} dt \Rightarrow C(t) = P(t+1) - P(t) \quad (3)$$

De (1) e (2) estima-se que, em média, um indivíduo leve cerca de 15 dias para se recuperar da doença. A partir disso, podemos calcular o número de infectados $I(t)$ no instante t , definindo como o acumulado de infectados no intervalo $[t - 15, t]$ da seguinte maneira:

$$I(t) = \int_{t-15}^t P(t) dt \Rightarrow I(t) = P(t) - P(t - 15) \quad (4)$$

Dessa forma, podemos exibir os gráficos com a evolução da variação diária no número de confirmados e infectados estimado pela função $I(t)$ de acordo com modelo logístico ajustado aos dados dos boletins epidemiológicos de Cameté no ano de 2021:

Figura 3 – Gráfico de $C(t)$ e $I(t)$ no intervalo $[0, 350]$.



Fonte: Compilação do autor.

De acordo com o senso mais atual, Cametá possui uma população com cerca de 134184 habitantes IBGE (2023). Os números evidenciam essa situação, uma vez que o boletim oficial de Cametá indica que cerca de 17.640 indivíduos foram testados até 03/09/2021 CAMETÁ (2021), o que corresponde aproximadamente a 13,14% da população total. Considerando a hipótese de que o comportamento da doença seja uniforme em toda a cidade, torna-se necessário aplicar um fator de amplificação proporcional a população, com um valor superior a 7,6068. A curva de infectados fica da seguinte maneira:

$$I_v(t) = \alpha \cdot I_v(t)$$

Onde,

$$\alpha = \frac{\text{População total}}{\text{População testada}} = \frac{134184}{17640} = 7,6068 \quad (5)$$

Dai de (7), obtemos:

$$I_v(t) = 7,6068[P(t) - P(t - 15)]$$

Com a mesma abordagem, ajustamos as funções de recuperados (2) e de crescimento de novos casos diários (3), definiremos também uma função que descreve o número de indivíduos suscetíveis:

$$C_{d_v}(t) = 7,6068[P(t + 1) - P(t)] \quad (6)$$

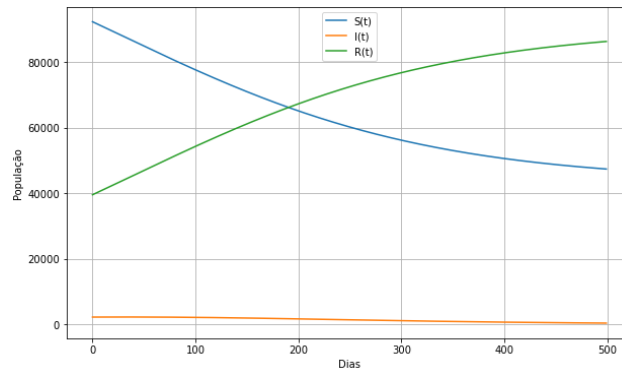
$$I_v(t) = 7,6068[P(t) - P(t - 15)] \quad (7)$$

$$R_v(t) = 7,6068[P(t - 15)] \quad (8)$$

$$S_v(t) = 134184 - [I_v(t) + R(t)_v] \quad (9)$$

Onde se obtém os seguintes gráficos:

Figura 4 – Evolução de I_v , R_v e S_v em $[0, 500]$.

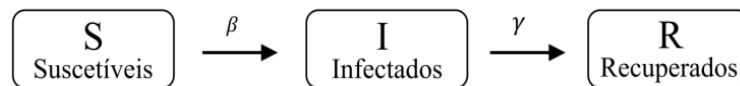


Fonte: Compilação do autor.

Os modelos SIR e SIRS aplicados ao município de Cametá no ano de 2021.

De acordo com (SABETI, 2011) o modelo epidemiológico SIR, desenvolvido por Kermack e McKendrick em 1929, trata-se de um modelo compartimental que divide a população em três classes distintas. A classe dos suscetíveis, representada por $S(t)$, engloba os indivíduos saudáveis que estão expostos a uma possível infecção. A classe dos infectados, representada por $I(t)$, inclui os indivíduos que estão atualmente infectados e podem transmitir a doença a outras pessoas. A classe dos recuperados, representada por $R(t)$, engloba os indivíduos que se recuperaram da doença e adquiriram imunidade.

Figura 5 – Fluxograma do modelo epidemiológico SIR.



Fonte: Compilação do autor

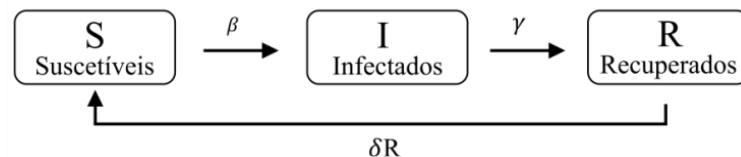
A partir do fluxograma, representando por $N = S + I + R$ a população total, observa-se que a dinâmica que pode ser descrita através do seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta SI}{N} \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\beta SI}{N} - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I \end{cases} \quad (10)$$

Segundo (LÓPEZ-FLORES et al, 2021) β , γ são constantes de proporcionalidade positivas, definindo β como a taxa de infecção e γ é a taxa de recuperação dos indivíduos infectados.

O modelo epidemiológico SIRS (Suscetível-Infetado-Recuperado-Suscetível) é uma extensão do modelo SIR que considera uma dinâmica mais realista. Enquanto o modelo SIR supõe imunidade permanente após a recuperação, o SIRS reconhece que os recuperados podem perder a imunidade ao longo do tempo. Isso significa que, no modelo SIRS, após a recuperação, os indivíduos podem se tornar suscetíveis à infecção novamente. Essa abordagem mais flexível reflete a possibilidade de reinfecção, como observado em algumas doenças. Essa característica é evidente nas equações do modelo e em seu diagrama de fluxo:

Figura 6 – Fluxograma do modelo epidemiológico SIRS.



Fonte: Compilação do autor.

A partir do fluxograma, expressamos a dinâmica do modelo por meio do seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta SI}{N} + \delta R \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\beta SI}{N} - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I - \delta R \end{cases}$$

Para este modelo as mesmas hipóteses do modelo SIR serão consideradas, exceto que exista imunidade absoluta.

Estimativa da taxa de recuperação Gama e do coeficiente de infecção beta

De acordo com o (LÓPEZ-FLORES et al, 2021), consideremos a situação em que toda a população está infectada e não ocorrem reinfecções, o que isola o fenômeno de recuperação. Dessa forma, a equação (14) é simplificada para um problema de valor inicial:

$$\frac{dI}{dt} = -\gamma I, \quad I(0) = 1$$

Definindo o tempo médio de infecção por:

$$T_m(t) = \frac{1}{\gamma}$$

Que descreve a taxa de recuperação do modelo SIR. Anteriormente, o tempo médio de infecção foi estimado em 15 dias. Dessa forma, podemos exibir a taxa de recuperação para o modelo SIR aplicada no contexto epidemiológico de Cametá no ano de 2021.

$$T_m = 15 \Rightarrow T_m^{-1}(t) = \frac{1}{15} = \gamma$$

Portanto, para nossas simulações utilizaremos um valor fixo para o parâmetro que representa a taxa de recuperação $\gamma = 0,06666666667$.

Seja $I(t)$ o número de infectados no instante t , a taxa de novas infecções na população inteira, no momento t , será obtida por:

$$\frac{\text{novas pessoas infectadas}}{\text{dia}} = \beta \cdot \frac{S(t)}{N} \cdot I(t) - \gamma I$$

Para tal, utilizaremos os números de suscetíveis e infectados obtidos por meio da adaptação do modelo de Verhulst em (6), (7) e (9), bem como a taxa de recuperação estimada anteriormente. Temos:

$$C_{d_v}(t) = \beta \cdot \frac{S_v(t) \cdot I_v(t)}{N} - \gamma I_v(t) \Rightarrow C_{d_v}(0) = \beta \cdot \frac{S_v(0) \cdot I_v(0)}{134184} - \frac{I(0)}{15}$$

Onde $N = 134184$ corresponde à população do município de Cametá. Isso nos leva a:

$$\beta = \left(C_{d_v}(0) + \frac{I_v(0)}{15} \right) \cdot \frac{134184}{S_v(0) \cdot I_v(0)} = \beta = 0,07988999291805106$$

Assim, obtivemos a estimativa do valor de $\beta = 0,07988999291805106$.

Aplicação do modelo SIR e SIRS ao contexto epidemiológico de Cametá.

Com base nos dados disponibilizados pela Secretaria de Saúde do município, conforme registrado em um dos primeiros boletins epidemiológicos datados de 30/04/2020 foi constatado um total de aproximadamente 25 indivíduos infectados (CORRÊA, 2021). Esse número é adotado como o valor inicial no dia 0 para a aplicação do modelo SIR no contexto municipal. A fim de alinhar os dados oficiais à realidade, faremos uma multiplicação por um fator α nas nossas condições iniciais. Desta forma, temos:

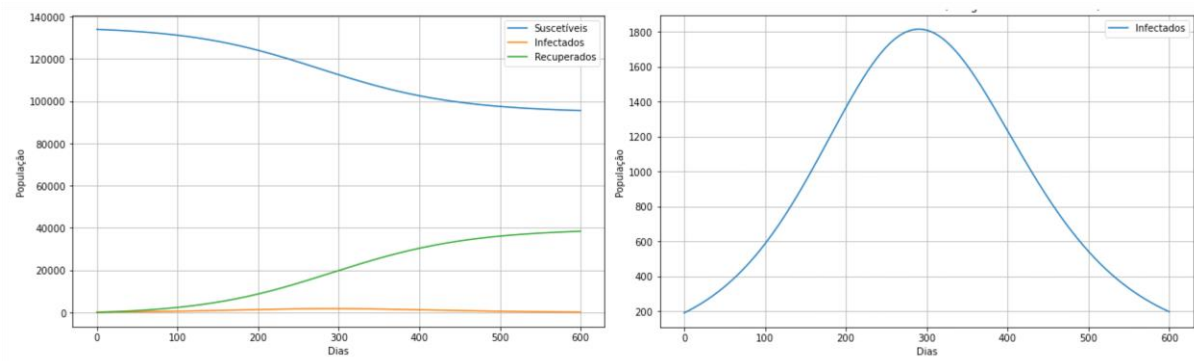
$$\alpha \cdot I(0) = 7,6068 \cdot 25 \cong 190$$

$$\alpha \cdot R(0) = 7,6068 \cdot 1 \cong 8$$

$$S(0) = 134184 - \alpha \cdot [I(0) + R(0)]$$

Com base na taxa de recuperação $\gamma = 0,06666666667$ e no coeficiente de infecção $\beta = 0,07988999291805106$ obtidos por meio desta pesquisa, é possível apresentar os gráficos que ilustram a aplicação do modelo SIR ao município. Para esse propósito, a linguagem de programação Python foi adotada como a ferramenta de escolha para criar o código necessário. A elaboração dos gráficos foi realizada utilizando o ambiente Jupyter Notebook. Utilizando o método de Runge-Kutta de quarta ordem para exibir as soluções, obtemos os seguintes gráficos:

Figura 7 – Evolução dos primeiros 600 dias do Modelo SIR e I(t) aplicado a Cametá aplicado a Cametá.

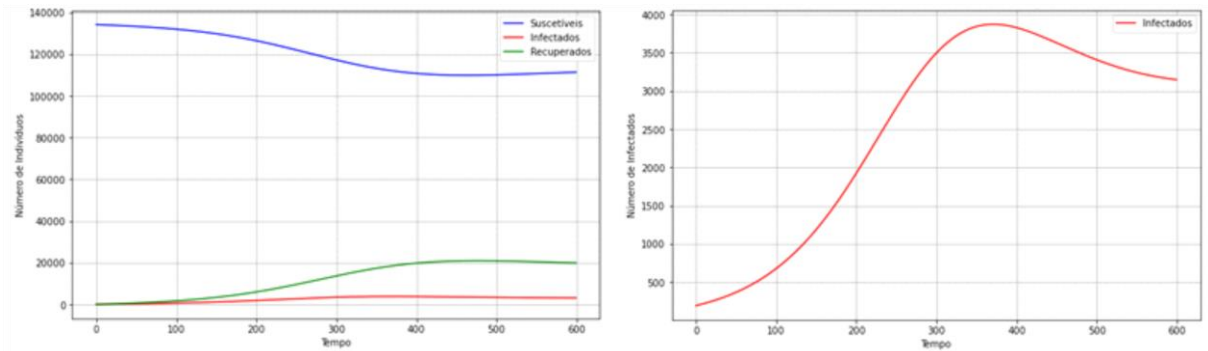


Fonte: Compilação do autor.

Com o intuito de obter estimativas mais condizentes com a realidade, surge a abordagem do modelo SIRS. Para tal, utilizaremos os mesmos parâmetros estimados para o modelo SIR, adicionando a nossa simulação a taxa de reinfecção δ . Estudos indicam que, em média, um indivíduo perde sua imunidade após a reinfecção em um período de 90 dias

(PULLIAM, Juliet RC et al). Dessa forma, adotaremos o valor $\delta = 1/90$, em que δR representa a fração da população que, após um período de 90 dias, retorna à condição de suscetibilidade. Assim, obtemos o gráfico referente ao modelo SIRS aplicado a Cameté:

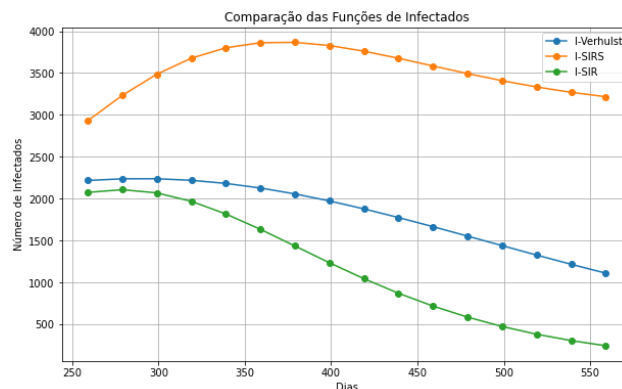
Figura 8 – Evolução dos primeiros 600 dias do modelo SIRS e I(t) para os primeiros 600 dias do modelo SIRS.



Fonte: Compilação do autor.

Com o intuito de explorar a dinâmica da epidemia de COVID-19 em Cameté durante o ano de 2021, realizaremos uma comparação gráfica dos resultados obtidos a partir dos modelos de Verhulst, SIR e SIRS. Optamos por adotar como ponto de referência o dia 14/01/2021. Essa data corresponde ao primeiro dia no modelo de Verhulst e ao dia 259 nos modelos SIR e SIRS que não levam em conta a vacinação neste período. Dessa forma, garantimos uma sincronização temporal que permite uma comparação significativa e consistente entre os diferentes enfoques.

Figura 9 – Comparação entre o numero de infectados dos modelos Verhulst, SIR e SIRS em 2021.



Fonte: Compilação do autor.

DISCUSSÃO

Em 2021, a cidade de Cametá enfrentou desafios significativos devido à pandemia da Covid-19. O número diário de casos confirmados aumentou consideravelmente até atingir o pico de aproximadamente 20 casos em fevereiro. A partir de então, houve uma desaceleração dos novos casos, e a pandemia pareceu estar se estabilizando. Para combater a disseminação do vírus, a cidade implementou diversas medidas, incluindo o uso de máscaras, distanciamento social, barreiras sanitárias e *lockdown*. A partir de 17/01/2021, essas ações foram normatizadas por decreto. Nesse momento, a cidade já tinha registrado 6.238 casos confirmados, 6.093 recuperados e 127 óbitos. Além disso, uma campanha de vacinação foi iniciada, com a aplicação de 94.579 primeiras doses e 78.656 segundas doses ao longo de 52 semanas. Na figura 3, observa-se que essa campanha desempenhou um papel importante na desaceleração do número de novos casos, particularmente a partir de 14/02/2022, quando ao observar o panorama de infectados em $t = 31$ (aproximadamente 14/02/2022), estima-se que cerca de 2.236 pessoas foram afetadas pela Covid-19, e esse número diminuiu para cerca de 801 até $t = 365$. A coincidência entre o início da vacinação e a diminuição dos casos sugere um possível efeito positivo das campanhas de vacinação.

Os gráficos na figura 7 mostram que houve um aumento acentuado no número de indivíduos infectados nos primeiros 290 dias, atingindo o pico em 15/02/2021, com aproximadamente 1.815 infectados. Após essa data, ocorreu uma diminuição gradual, chegando a cerca de 197 infectados até 21/12/2021. Isso sugere que cerca de 29% da população de Cametá pode ter sido infectada até essa data. Entretanto, no modelo SIRS os gráficos indicam um aumento significativo no número de indivíduos infectados $I(t)$, nos primeiros 371 dias. No dia 371, o número de infectados atinge o pico de 3870. Isso corresponde a 06/05/2021, considerando 30/04/2020 como ponto de referência. Após essa data, a taxa de infecção desacelera gradualmente, diferindo do modelo SIR convencional, e se estabiliza em torno de 3145 infectados. O modelo SIR não considerou a possibilidade de reinfeção e, portanto, projetaram menos infectados, com uma taxa de diminuição mais acentuada. O modelo SIRS considerou a possibilidade de reinfeção, o que resultou em números mais elevados de infectados, embora ambas as modelagens mostrassem tendências gerais de decréscimo. É importante observar que nenhum dos modelos incorporou a influência da vacinação na dinâmica da doença, o que pode explicar algumas discrepâncias entre os números projetados e os números reais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da pandemia da COVID-19, a utilização da modelagem matemática com os modelos de Verhulst, SIR e SIRS foi eficaz e fundamental para apoiar os estudos epidemiológicos em Cametá no ano de 2021. Estes modelos possibilitaram ajustes de curvas e simulações numéricas que permitiram acompanhar a evolução da doença. No entanto, é importante reconhecer as limitações inerentes aos modelos, como as incertezas nos parâmetros e as simplificações da realidade. Ainda assim, em um contexto de desafios complexos e incertezas contínuas, a modelagem matemática se revelou uma ferramenta valiosa para compreender e prever a propagação do vírus.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Saúde. Coronavírus Brasil, 2023. Painel Coronavírus. Disponível em: <<https://www.saude.gov.br/saude-de-a-z/coronavirus>>. Acesso em: 28 Maio 2023.

CAMETÁ (Cidade). Secretaria de municipal de Saúde Pública. Diretoria de Vigilância em Saúde. PLANO MUNICIPAL DE VACINAÇÃO – PMV/COVID-19. Cametá, 2021. 1 p.

G1 PARÁ, "Cametá implementa restrições mais rigorosas na circulação de pessoas." Disponível em: <<https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2021/03/15/cameta-toma-medidas-mais-rigidas-de-circulacao-de-pessoas-a-partir-de-quarta-feira-17.ghtml>>, Acesso em: 2 de julho de 2023.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo, 2023. Disponível em: <cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/cameta>. Acesso em: 30 Junho 2023.

CAMETÁ (Cidade). Secretaria Municipal de Saúde de Cametá. BOLETIM EPIDEMIOLÓGICO atualizado em 26/11/2022: Infecção pelo Novo Coronavírus (2019-nCoV). Disponível em: <prefeituradecameta.pa.gov.br>. Acesso em: 14 Julho 2023.

SABETI, Mehran. Modelo Epidêmico Discreto SIR com estrutura etária e aplicação de vacinação em pulsos e constante. 2011.

LÓPEZ-FLORES, Marlon M. et al. Equações diferenciais e modelos epidemiológicos. Editora do IMPA, 2021.

R. R. L. CORRÊA, "Equações diferenciais aplicadas à epidemiologia com suporte do método de diferenças finitas," 2022. Cametá, p. 46.

PULLIAM, Juliet RC et al. Increased risk of SARS-CoV-2 reinfection associated with emergence of Omicron in South Africa. **Science**, v. 376, n. 6593, p. eabn4947, 2022.