

Workshop de Verão ICMC 2024

# Desafios na modelagem e simulações de dinâmicas epidemiológicas: o caso da COVID-19 no Brasil



Marina Lima  
João Frederico C. A. Meyer



[marina@ime.unicamp.br](mailto:marina@ime.unicamp.br)

# Conteúdo

- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica
- 3 COVID-19
- 4 Primeira Onda
- 5 Ondas Sucessivas
- 6 Variante Ômicron
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras

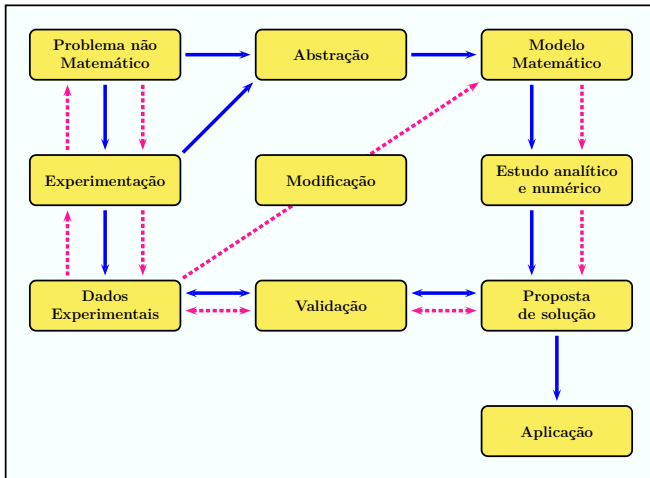
- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica
- 3 COVID-19
- 4 Primeira Onda
- 5 Ondas Sucessivas
- 6 Variante Ômicron
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras

## Precisamos da Modelagem Matemática para

- 1 “Ler” o mundo
- 2 Construir conhecimento no diálogo
- 3 Criticar esse conhecimento
- 4 Colocar a ciência a serviço da comunidade

Meyer e Lima (2022) *ZDM – Mathematics Education*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelagem Matemática



Autoria própria, adaptado de Bassanezi (2002)

# Dinâmica Populacional

- Como se comportam as populações? de pessoas, de animais, de pessoas que tomaram a vacina? de pessoas que não se vacinaram?
- Quantos peixes (alimento) ou quantos insetos (doença) ou quantas pessoas a serem vacinadas (saúde) haverá ano que vem? e quais são as políticas públicas necessárias?
- Contar indivíduos ou simular densidades populacionais...

# Modelos de crescimento

## Malthus (1798)

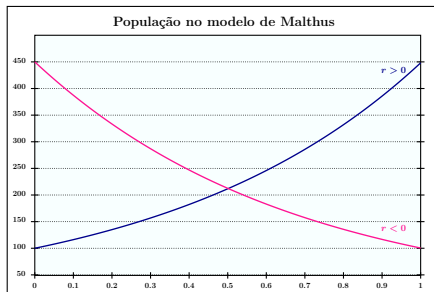
- Alimento  $A(t)$  cresce em progressão aritmética
- População  $P(t)$  cresce em progressão geométrica
- Em algum momento,  $P(t)$  ultrapassa o que  $A(t)$  fornece

$$\begin{cases} \frac{dP(t)}{dt} = rP(t) \\ P(0) = P_0 \end{cases}$$

$r > 0$  taxa de crescimento

$r < 0$  taxa de declínio

$$P(t) = P_0 e^{rt}$$



Inevitavelmente, acontecerão: guerras, pragas, epidemias, fome...

# Modelos de crescimento

## Verhulst (1838)

- Fatores limitantes para crescimento populacional: **capacidade de suporte**
- A taxa de crescimento varia ao longo do tempo

$$\frac{dP(t)}{dt} = rP(t) \left[ 1 - \frac{P(t)}{K} \right] \implies \text{Equação Logística}$$

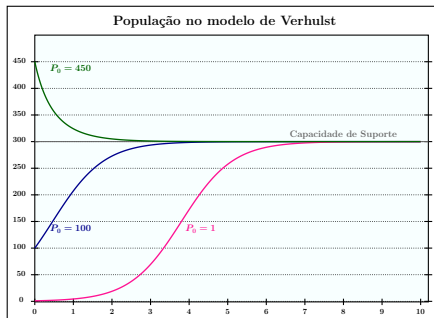
$r$  taxa de crescimento

$K$  capacidade de suporte

$P \rightarrow K$ : taxa de crescimento se reduz até chegar a zero

$P = K$  capacidade máxima populacional

$$P(t) = \frac{P_0 K}{P_0 + (K - P_0)e^{-rt}}$$

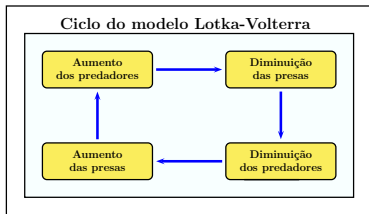




# Modelos de crescimento

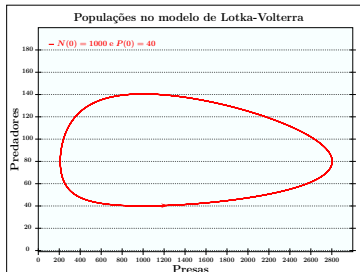
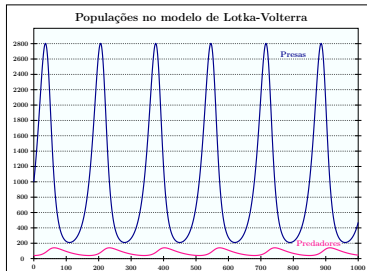
## Lotka-Volterra (1925)

- Modelo presa  $N(t)$  e predador  $P(t)$



$$\frac{dN}{dt} = \alpha N(t) - \beta N(t)P(t), N(0) = N_0$$
$$\frac{dP}{dt} = \delta N(t)P(t) - \gamma P(t), P(0) = P_0$$

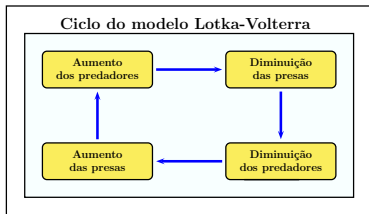
- $\alpha$  crescimento das presas
- $\gamma$  morte dos predadores pela falta de comida
- $\beta$  constante de mortalidade das presas
- $\delta$  natalidade dos predadores



# Modelos de crescimento

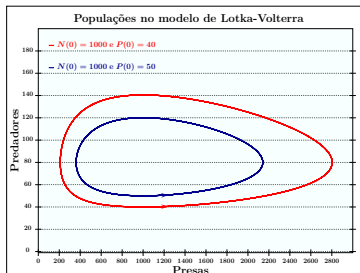
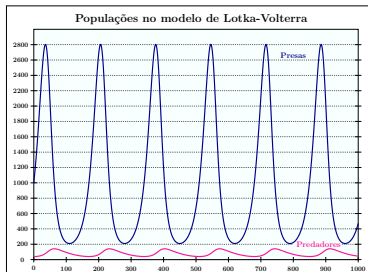
## Lotka-Volterra (1925)

- Modelo presa  $N(t)$  e predador  $P(t)$



$$\frac{dN}{dt} = \alpha N(t) - \beta N(t)P(t), N(0) = N_0$$
$$\frac{dP}{dt} = \delta N(t)P(t) - \gamma P(t), P(0) = P_0$$

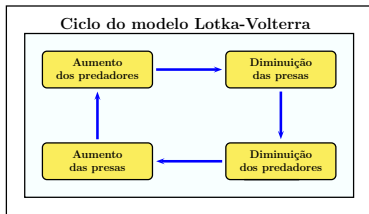
- $\alpha$  crescimento das presas
- $\gamma$  morte dos predadores pela falta de comida
- $\beta$  constante de mortalidade das presas
- $\delta$  natalidade dos predadores



# Modelos de crescimento

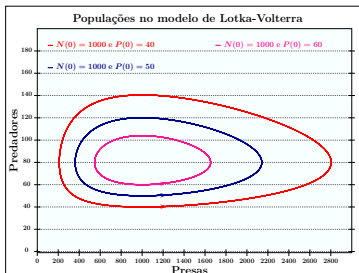
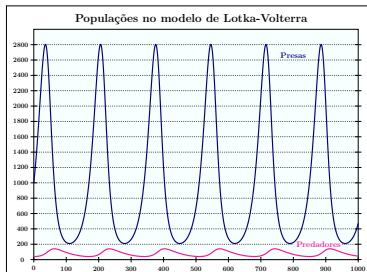
## Lotka-Volterra (1925)

- Modelo presa  $N(t)$  e predador  $P(t)$



$$\frac{dN}{dt} = \alpha N(t) - \beta N(t)P(t), N(0) = N_0$$
$$\frac{dP}{dt} = \delta N(t)P(t) - \gamma P(t), P(0) = P_0$$

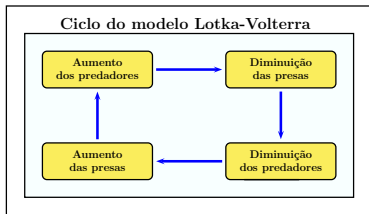
- $\alpha$  crescimento das presas
- $\gamma$  morte dos predadores pela falta de comida
- $\beta$  constante de mortalidade das presas
- $\delta$  natalidade dos predadores



# Modelos de crescimento

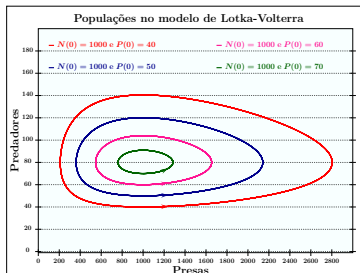
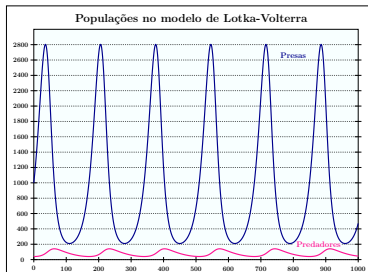
## Lotka-Volterra (1925)

- Modelo presa  $N(t)$  e predador  $P(t)$



$$\frac{dN}{dt} = \alpha N(t) - \beta N(t)P(t), N(0) = N_0$$
$$\frac{dP}{dt} = \delta N(t)P(t) - \gamma P(t), P(0) = P_0$$

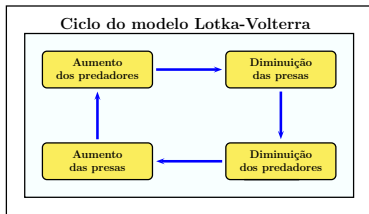
- $\alpha$  crescimento das presas
- $\gamma$  morte dos predadores pela falta de comida
- $\beta$  constante de mortalidade das presas
- $\delta$  natalidade dos predadores



# Modelos de crescimento

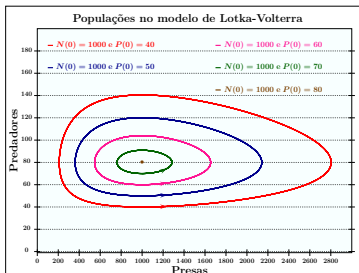
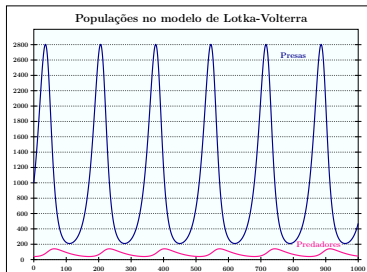
## Lotka-Volterra (1925)

- Modelo presa  $N(t)$  e predador  $P(t)$



$$\frac{dN}{dt} = \alpha N(t) - \beta N(t)P(t), N(0) = N_0$$
$$\frac{dP}{dt} = \delta N(t)P(t) - \gamma P(t), P(0) = P_0$$

- $\alpha$  crescimento das presas
- $\gamma$  morte dos predadores pela falta de comida
- $\beta$  constante de mortalidade das presas
- $\delta$  natalidade dos predadores



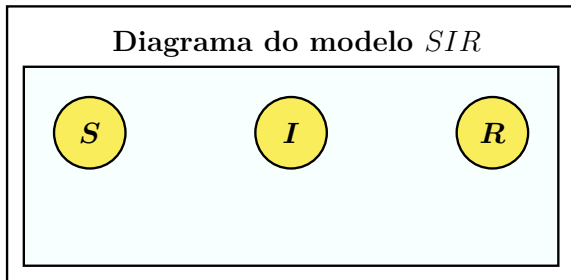
- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica**
- 3 COVID-19
- 4 Primeira Onda
- 5 Ondas Sucessivas
- 6 Variante Ômicron
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras

# Modelo *SIR*

- Kermack e McKendrick, 1927, 1932, 1933
- Divisão compartimental da população

# Modelo *SIR*

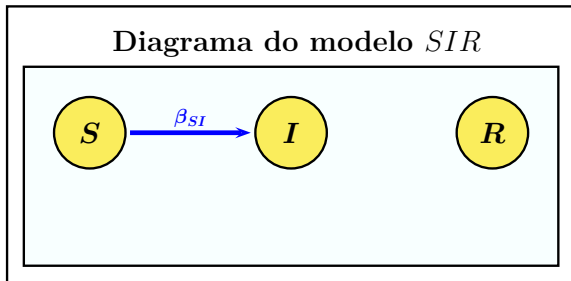
- Kermack e McKendrick, 1927, 1932, 1933
- Divisão compartimental da população
- *SIR*: Suscetível - Infectado - Resistente ou Removido





# Modelo *SIR*

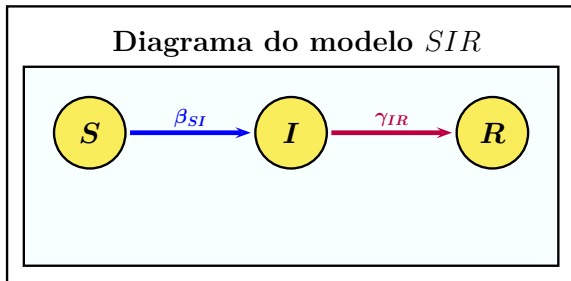
- Kermack e McKendrick, 1927, 1932, 1933
- Divisão compartimental da população
- *SIR*: Suscetível - Infectado - Resistente ou Removido



$\beta_{SI}$ : taxa de transmissão

# Modelo *SIR*

- Kermack e McKendrick, 1927, 1932, 1933
- Divisão compartimental da população
- *SIR*: Suscetível - Infectado - Resistente ou Removido

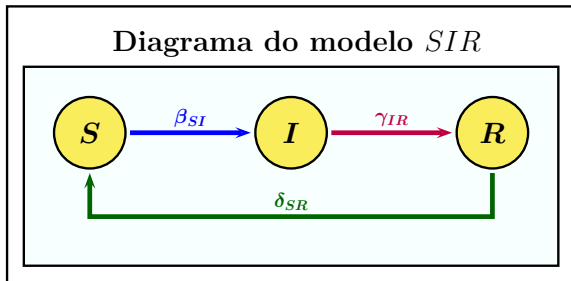


$\beta_{SI}$ : taxa de transmissão

$\gamma_{IR}$ : taxa de recuperação

# Modelo *SIR*

- Kermack e McKendrick, 1927, 1932, 1933
- Divisão compartimental da população
- *SIR*: Suscetível - Infectado - Resistente ou Removido



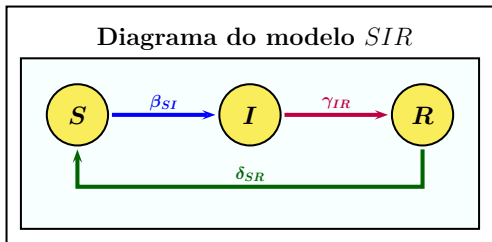
$\beta_{SI}$ : taxa de transmissão

$\gamma_{IR}$ : taxa de recuperação

$\delta_{SR}$ : taxa de perda de imunidade

Meyer e Lima (2022) *ZDM – Mathematics Education*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelo SIR

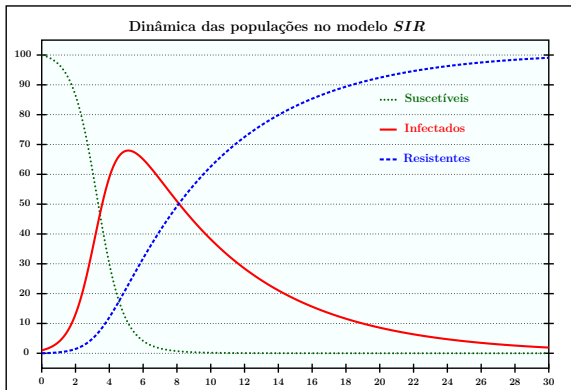


$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta_{SI} \cdot S(t) \cdot I(t) + \delta_{SR} \cdot R(t)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta_{SI} \cdot S(t) \cdot I(t) - \gamma_{IR} \cdot I(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma_{IR} \cdot I(t) - \delta_{SR} \cdot R(t)$$

# Modelo SIR

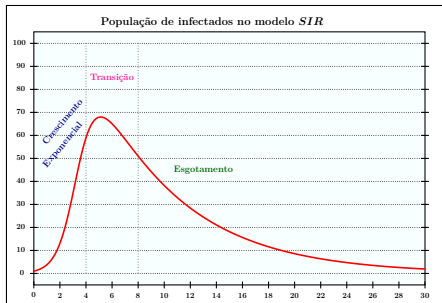


Meyer e Lima (2022) *ZDM – Mathematics Education*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelo SIR

- Equação dos infectados ( $S_0 = 100$ )

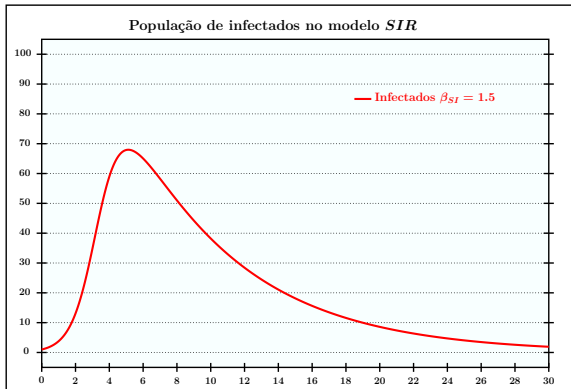
$$\frac{dI}{dt} = \beta_{SI} S_0 I(t) - \gamma_{IR} I(t) \implies I(t) = e^{(\beta_{SI} S_0 - \gamma_{IR})t}$$



- Comportamento exponencial no início  $\frac{S(t)}{N(t)} > \frac{\gamma_{IR}}{\beta_{SI}}$
- Fase transitória
- Pico  $S(t) = \frac{\gamma_{IR}}{\beta_{SI}} N(t)$  limitante da epidemia
- Infectados se tornam recuperados  $\frac{S(t)}{N(t)} < \frac{\gamma_{IR}}{\beta_{SI}}$

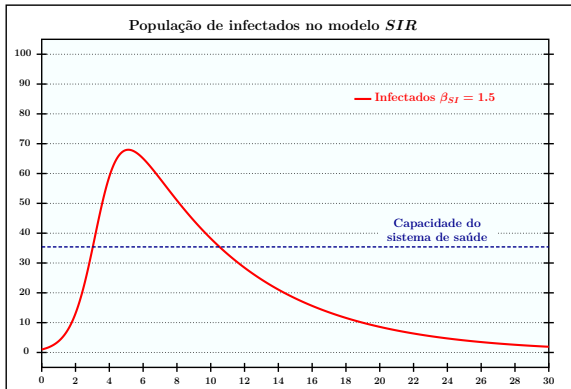
# Modelo *SIR*

- Variação da taxa de transmissão  $\beta_{SI}$



# Modelo *SIR*

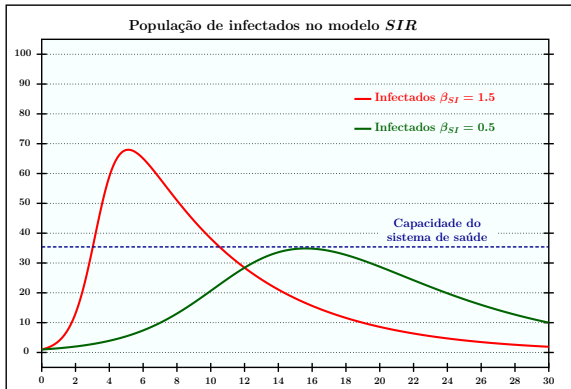
- Variação da taxa de transmissão  $\beta_{SI}$





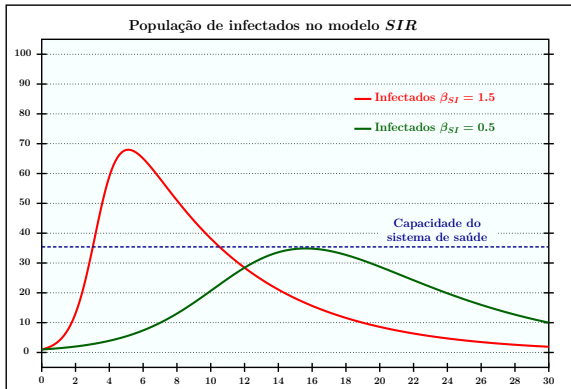
# Modelo SIR

- Variação da taxa de transmissão  $\beta_{SI}$



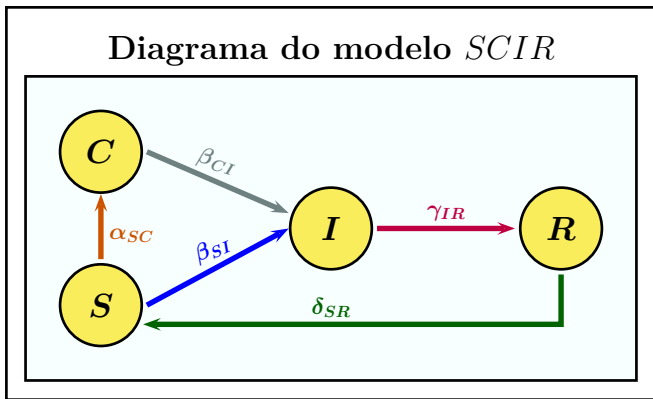
# Modelo SIR

- Variação da taxa de transmissão  $\beta_{SI}$



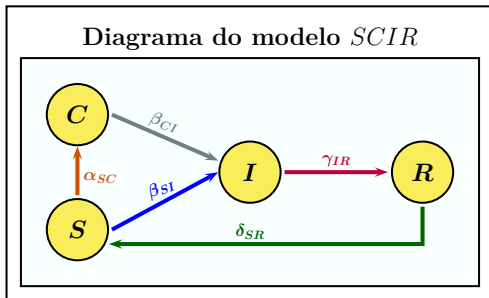
“Achatamento da curva” de infecção

# Modelo com Modelo com Confinamento - *SCIR*



Meyer e Lima (2022) *ZDM – Mathematics Education*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelo com Confinamento - SCIR



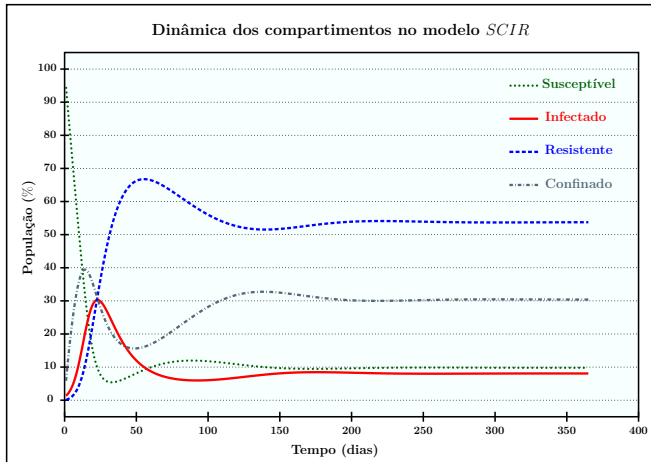
$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta_{SI}.S(t).I(t) - \alpha_{SC}.S(t) + \delta_{SR}.R(t)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha_{SC}.S(t) - \beta_{CI}.C(t).I(t)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta_{SI}.S(t).I(t) + \beta_{CI}.C(t).I(t) - \gamma_{IR}.I(t)$$

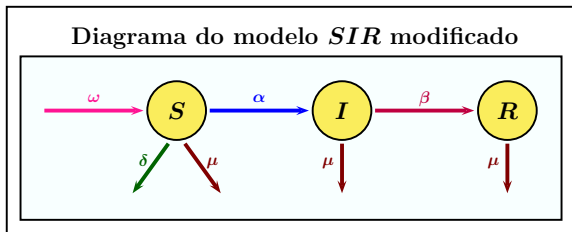
$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma_{IR}.I(t) - \delta_{SR}.R(t)$$

# Modelo com Confinamento - SCIR



Meyer e Lima (2022) *ZDM – Mathematics Education*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*



$\alpha$ : taxa de transmissão

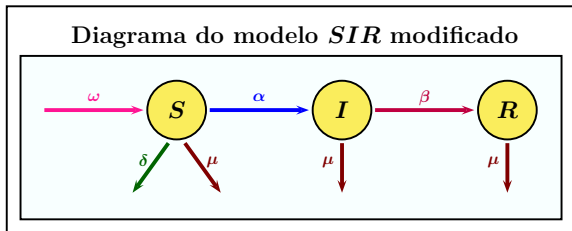
$\beta$ : taxa de recuperação

$\omega$ : taxa de natalidade

$\mu$ : taxa de mortalidade

$\delta$ : taxa de vacinação

# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*

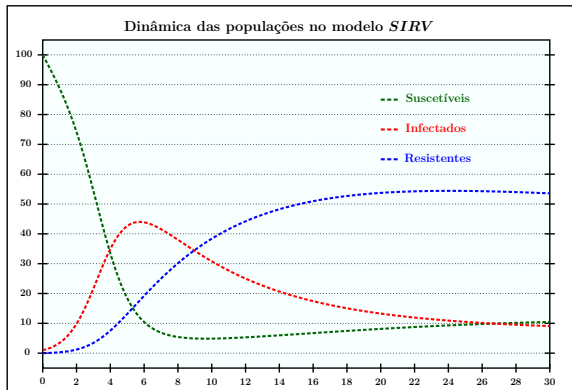


$$\frac{dS}{dt} = -\alpha \frac{S(t)I(t)}{N(t)} + \omega N(t) - \mu S(t) - \delta S(t)$$

$$\frac{dI}{dt} = \alpha \frac{S(t)I(t)}{N(t)} - \beta I(t) - \mu I(t)$$

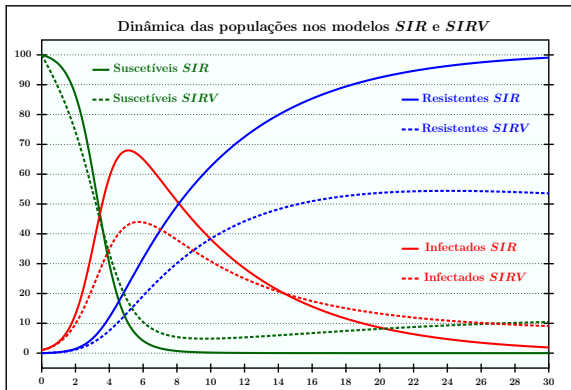
$$\frac{dR}{dt} = \beta I(t) - \mu R(t)$$

# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*

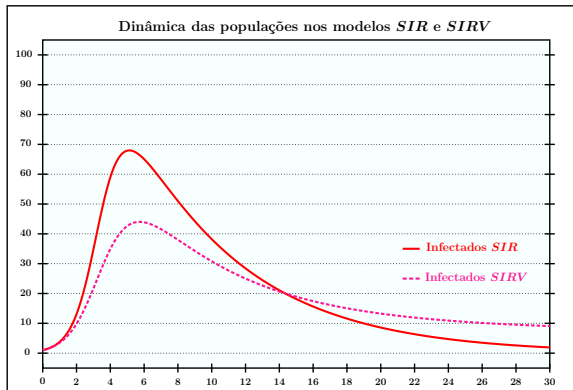




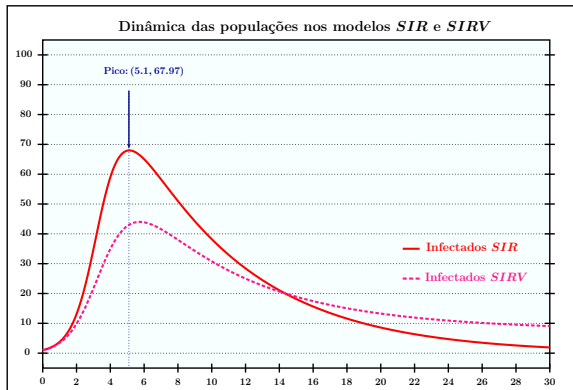
# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*



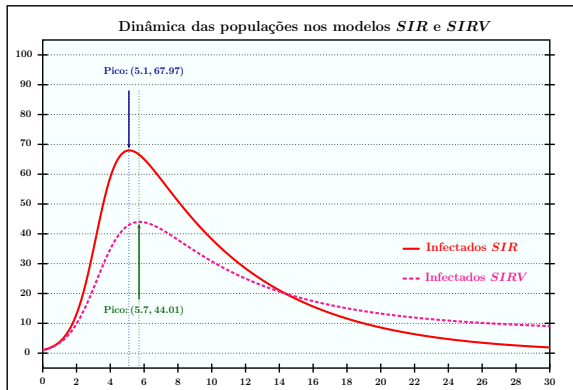
# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*



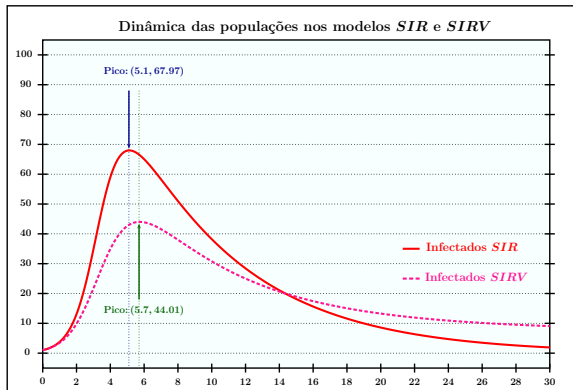
# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*



# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*

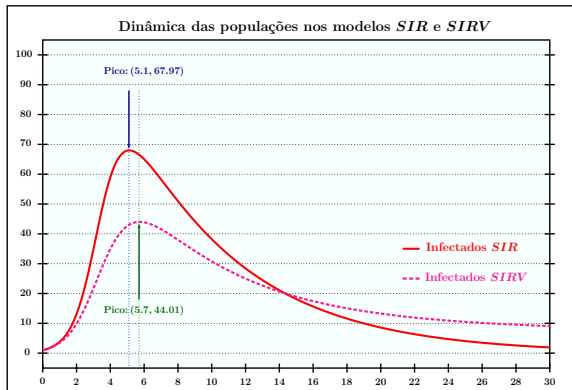


# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*



Redução de 0.6 dia na ocorrência do pico

# Modelo com dinâmica vital e vacinação - *SIRV*



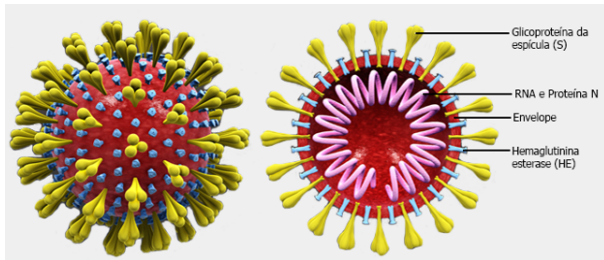
Redução de 0.6 dia na ocorrência do pico

Redução de 35.3% dos casos no pico

- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica
- 3 COVID-19**
- 4 Primeira Onda
- 5 Ondas Sucessivas
- 6 Variante Ômicron
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras

# COVID-19

- Doença infecciosa respiratória - dezembro de 2019 - China
- Alimentação de animais silvestres? Morcego, pangolim...
- Coronavírus: SARS-CoV-2

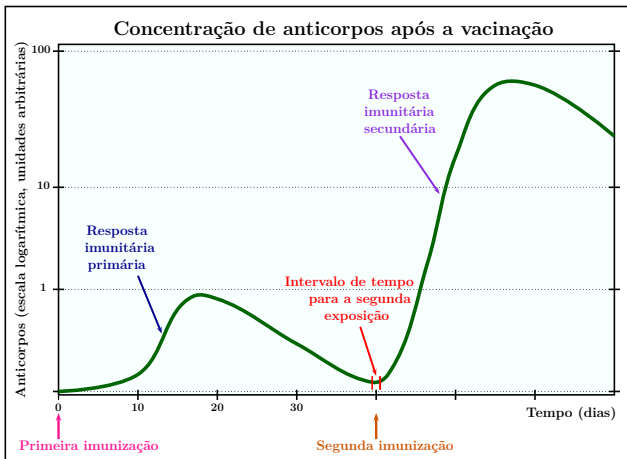


- Infecção através das vias respiratórias
- Testes para detectar o vírus
- Tempo de incubação e assintomáticos
- Desenvolvimento de vacinas



# COVID-19

Concentração de anticorpos específicos no corpo de uma pessoa após a vacinação e em uma segunda exposição ao mesmo antígeno



# COVID-19 no Mundo

Coronavirus Cases:

**699,739,720**

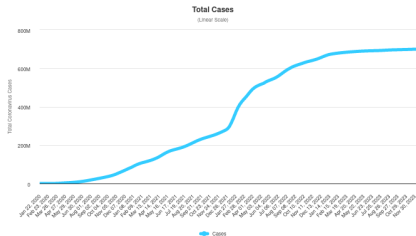
[view by country](#)

Deaths:

**6,957,602**

Recovered:

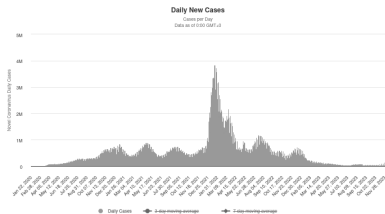
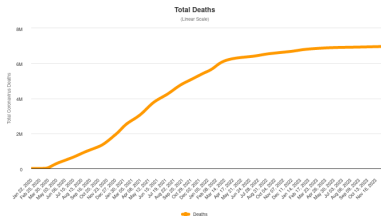
**669,473,354**



<https://www.worldometers.info/coronavirus/worldwide-graphs/>

Dados de 18 de dezembro de 2023

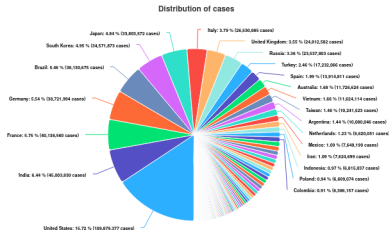
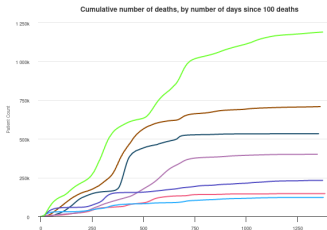
# COVID-19 no Mundo



<https://www.worldometers.info/coronavirus/worldwide-graphs/>

Dados de 18 de dezembro de 2023

# COVID-19 no Mundo



- População do Brasil: aproximadamente 217 milhões  
2,7% da população mundial
- COVID-19: 5,46% dos casos e 10,2% das mortes

<https://www.worldometers.info/coronavirus/worldwide-graphs/>  
<https://www.worldometers.info/population/>

Dados de 18 de dezembro de 2023

# COVID-19 no Brasil

- Primeiro caso: 26 de fevereiro de 2020



Brazil

Coronavirus Cases:

**38,130,675**

Deaths:

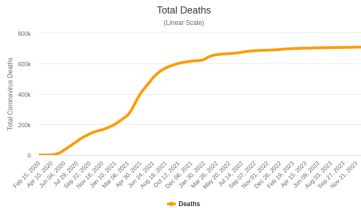
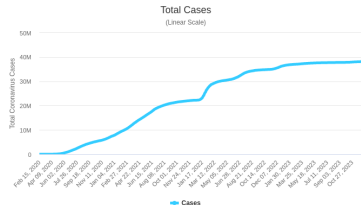
**708,237**

Recovered:

**36,249,161**

<https://www.worldometers.info/coronavirus/country/brazil/>

Dados de 18 de dezembro de 2023



# COVID-19

## Cronologia da COVID-19 neste trabalho



# COVID-19

## Cronologia da COVID-19 neste trabalho

01/01/2020

20/10/2020

Período 1

Período 2

Período 3

# COVID-19

## Cronologia da COVID-19 neste trabalho

01/01/2020

20/10/2020

Período 1

Período 2

Período 3

- Início COVID-19
- 11/03 - Pandemia
- 26/02 - Brasil
- Isolamento social
- Uso de máscaras
- Primeira onda



# COVID-19

## Cronologia da COVID-19 neste trabalho

01/01/2020

20/10/2020

01/01/2022

Período 1

Período 2

Período 3

- Início COVID-19
- 11/03 - Pandemia
- 26/02 - Brasil
- Isolamento social
- Uso de máscaras
- Primeira onda

# COVID-19

## Cronologia da COVID-19 neste trabalho



# COVID-19

## Cronologia da COVID-19 neste trabalho

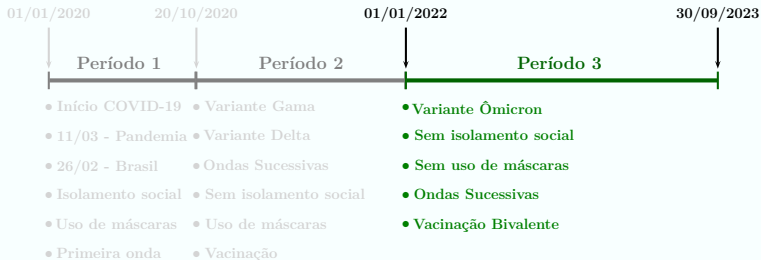
01/01/2020      20/10/2020      01/01/2022      30/09/2023



- Início COVID-19
- Variante Gama
- 11/03 - Pandemia
- Variante Delta
- 26/02 - Brasil
- Ondas Sucessivas
- Isolamento social
- Sem isolamento social
- Uso de máscaras
- Uso de máscaras
- Primeira onda
- Vacinação

# COVID-19

## Cronologia da COVID-19 neste trabalho



# COVID-19

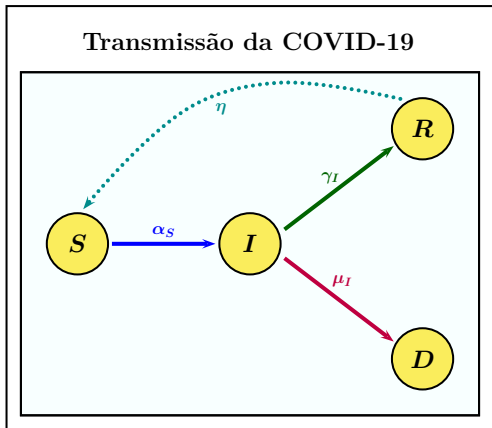
## Cronologia da COVID-19 neste trabalho



- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica
- 3 COVID-19
- 4 Primeira Onda**
- 5 Ondas Sucessivas
- 6 Variante Ômicron
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras

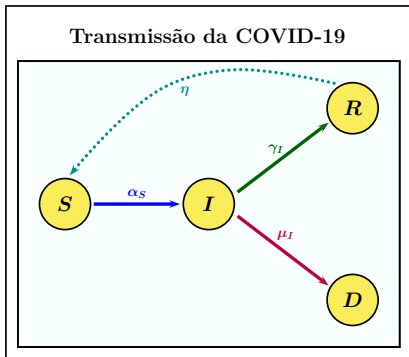
# Modelo SIRD

- Compartimentos  $S = S(t)$  (Suscetíveis),  $I = I(t)$  (Infectados),  $R = R(t)$  (Recuperados - com imunidade temporária) e  $D = D(t)$  (Mortos)



# Modelo SIRD

- População constante:  $S(t) + I(t) + R(t) + D(t) = N$



$$\frac{dS(t)}{dt} = -\alpha_S S(t)I(t) + \eta R(t);$$

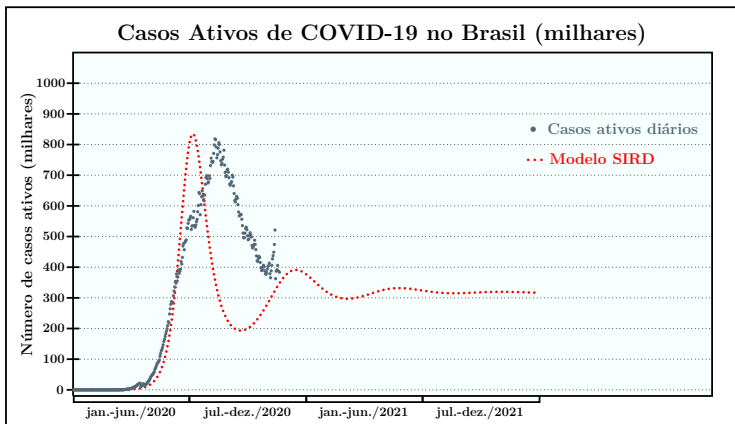
$$\frac{dI(t)}{dt} = \alpha_S S(t)I(t) - \gamma_I I(t) - \mu_I I(t);$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma_I I(t) - \eta R(t);$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \mu_I I(t).$$



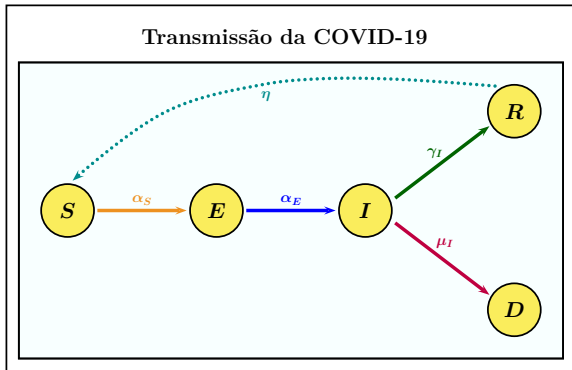
# Modelo SIRD



Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

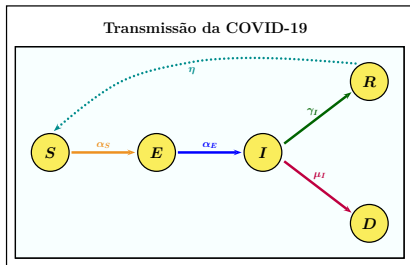
# Modelo SEIRD

- Inclusão do compartimento  $E = E(t)$  (Expostos - indivíduos que contraíram o vírus, mas não infectam outros, nem manifestam sintomas)



# Modelo SEIRD

- População constante:  $S(t) + E(t) + I(t) + R(t) + D(t) = N$



$$\frac{dS(t)}{dt} = -\alpha_S S(t)I(t) + \eta R(t);$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \alpha_S S(t)I(t) - \alpha_E E(t);$$

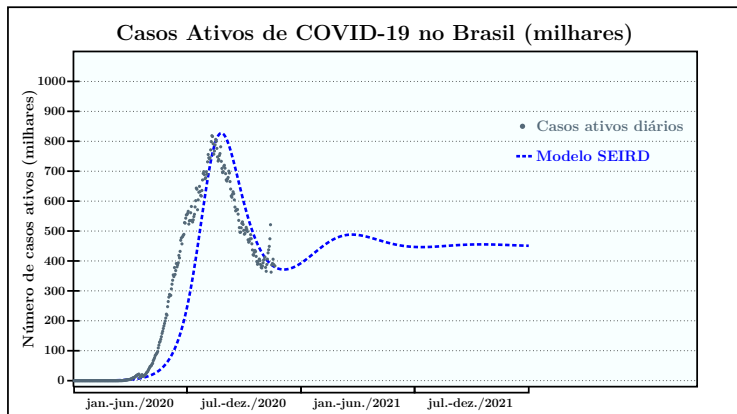
$$\frac{dI(t)}{dt} = \alpha_E E(t) - \gamma_I I(t) - \mu_I I(t);$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma_I I(t) - \eta R(t);$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \mu_I I(t).$$

Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelo SEIRD

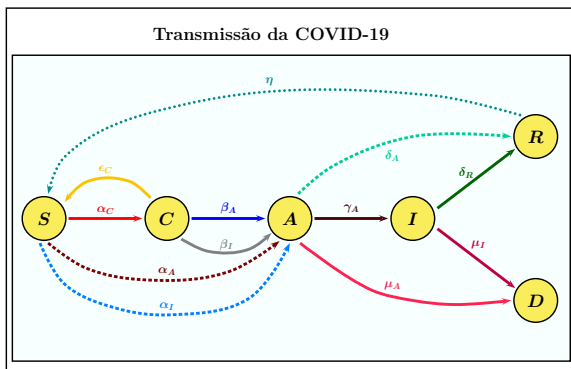


Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelo SCAIRD

- Inclusão dos confinados
- Modelo com retardamento (5.2 dias)
- População constante:

$$S(t) + C(t) + A(t) + I(t) + R(t) + D(t) = N$$



# Modelo SCAIRD

$$\frac{dS(t)}{dt} = \eta R(t) - \alpha_A S(t) A(t - \tau) - \alpha_I S(t) I(t) - \alpha_C S(t) + \epsilon_C C(t)$$

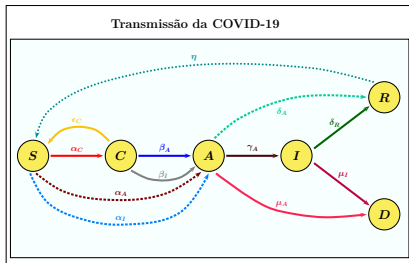
$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha_C S(t) - \beta_A C(t) A(t - \tau) - \beta_I C(t) I(t) - \epsilon_C C(t)$$

$$\frac{dA(t)}{dt} = \alpha_A S(t) A(t - \tau) + \alpha_I S(t) I(t) + \beta_A C(t) A(t - \tau) + \beta_I C(t) I(t) - \gamma_A A(t) - \delta_A A(t) - \mu_A A(t)$$

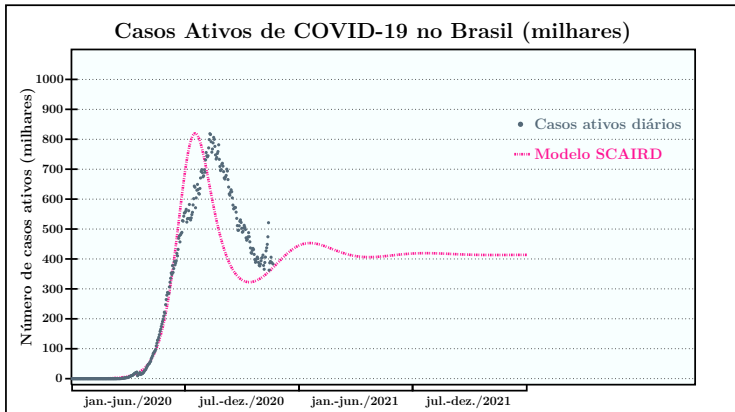
$$\frac{dI(t)}{dt} = \gamma_A A(t) - \delta_R I(t) - \mu_I I(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \delta_A A(t) + \delta_R I(t) - \eta R(t)$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \mu_I I(t) + \mu_A A(t)$$



# Modelo SCAIRD

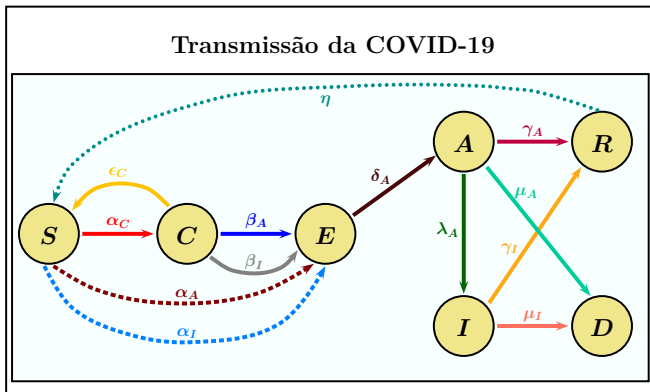


Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Modelo SCEAIRD

- População

constante:  $S(t) + C(t) + E(t) + A(t) + I(t) + R(t) + D(t) = N$



Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2



# Modelo SCEAIRD

$$\frac{dS(t)}{dt} = \epsilon_C C(t) - \alpha_C S(t) - \alpha_A S(t)A(t) - \alpha_I S(t)I(t) + \eta R(t)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha_C S(t) - \epsilon_C C(t) - \beta_A C(t)A(t) - \beta_I C(t)I(t)$$

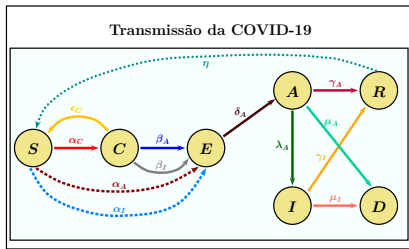
$$\frac{dE(t)}{dt} = \alpha_A S(t)A(t) + \alpha_I S(t)I(t) + \beta_A C(t)A(t) + \beta_I C(t)I(t) - \delta_A E(t)$$

$$\frac{dA(t)}{dt} = \delta_A E(t) - \gamma_A A(t) - \lambda_A A(t) - \mu_A A(t)$$

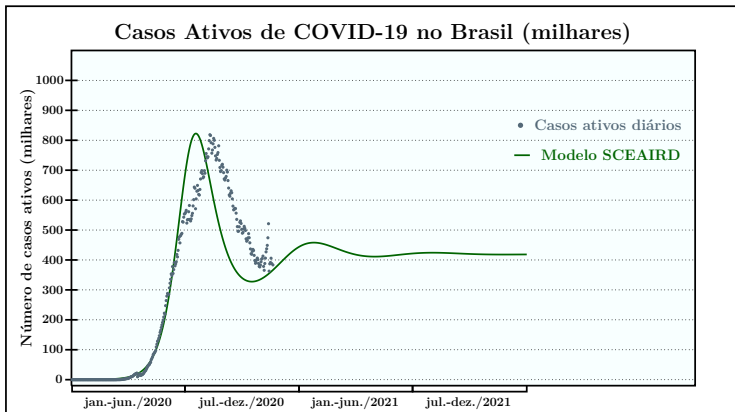
$$\frac{dI(t)}{dt} = \lambda_A A(t) - \gamma_I I(t) - \mu_I I(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma_A A(t) + \gamma_I I(t) - \eta R(t)$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \mu_I I(t) + \mu_A A(t).$$

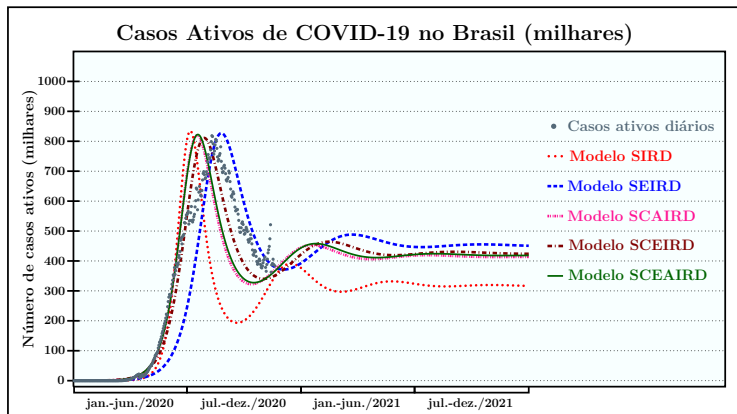


# Modelo SCEAIRD



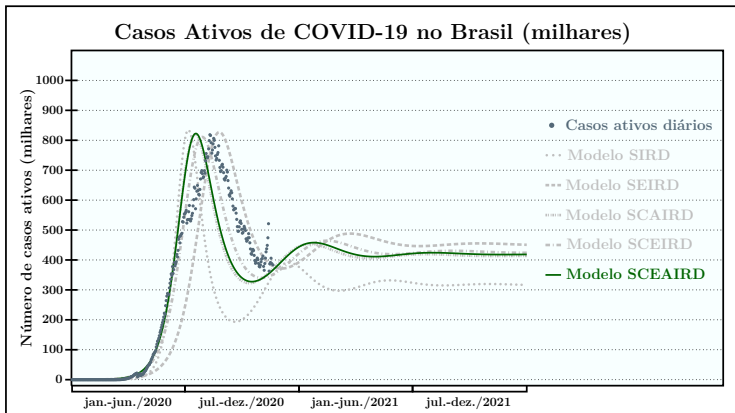
Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Comparativo



Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Comparativo



Meyer e Lima, et al. (2021) *Trends Comput. Appl. Math.*, doi:10.1007/s11858-022-01447-2

# Fim da primeira onda

# Fim da primeira onda

- COVID-19 controlada: flexibilização do comércio, eleições municipais, relaxamento do uso de máscara e medidas de proteção, negacionismo...

# Fim da primeira onda

- COVID-19 controlada: flexibilização do comércio, eleições municipais, relaxamento do uso de máscara e medidas de proteção, negacionismo...

## **Covid-19: Manaus vive colapso com hospitais sem oxigênio, doentes levados a outros estados, cemitérios sem vagas e toque de recolher**

A média móvel de mortes no estado cresceu 183% nos últimos sete dias. O envio de oxigênio ao estado não está sendo suficiente para suprir a demanda, e o governo está transferindo pacientes a outros estados.

14/01/2021 16h12 - Atualizado há 11 meses



# Fim da primeira onda

- COVID-19 controlada: flexibilização do comércio, eleições municipais, relaxamento do uso de máscara e medidas de proteção, negacionismo...

## **Covid-19: Manaus vive colapso com hospitais sem oxigênio, doentes levados a outros estados, cemitérios sem vagas e toque de recolher**

A média móvel de mortes no estado cresceu 183% nos últimos sete dias. O envio de oxigênio ao estado não está sendo suficiente para suprir a demanda, e o governo está transferindo pacientes a outros estados.

14/01/2021 16h12 - Atualizado há 11 meses



## **Covid avança e indica colapso generalizado pelo Brasil**

Especialistas veem cenário de colapso se aproximar e pregam medidas restritivas em âmbito nacional para frear alta de casos e de mortes por covid

Por Leila Souza Lima e Ana Conceição — De São Paulo  
04/03/2021 05h00 - Atualizado há 9 meses





# Fim da primeira onda

- COVID-19 controlada: flexibilização do comércio, eleições municipais, relaxamento do uso de máscara e medidas de proteção, negacionismo...

## Covid-19: Manaus vive colapso com hospitais sem oxigênio, doentes levados a outros estados, cemitérios sem vagas e toque de recolher

A média móvel de mortes no estado cresceu 183% nos últimos sete dias. O envio de oxigênio ao estado não está sendo suficiente para suprir a demanda, e o governo está transferindo pacientes a outros estados.

14/01/2021 16h12 - Atualizado há 11 meses



## Covid avança e indica colapso generalizado pelo Brasil

Especialistas veem cenário de colapso se aproximar e pregam medidas restritivas em âmbito nacional para frear alta de casos e de mortes por covid

Por Leila Souza Lima e Ana Conceição — De São Paulo  
04/03/2021 05h00 - Atualizado há 9 meses



## Covid-19: Brasil bate recorde com 4.249 mortes registradas em 24 horas

Número de pessoas recuperadas subiu para 11.732.193



Publicado em 08/04/2021 - 19:21 Por Jooa Válcete - Repórter da Agência Brasil - Brasil

# Fim da primeira onda

- COVID-19 controlada: flexibilização do comércio, eleições municipais, relaxamento do uso de máscara e medidas de proteção, negacionismo...

## Covid-19: Manaus vive colapso com hospitais sem oxigênio, doentes levados a outros estados, cemitérios sem vagas e toque de recolher

A média móvel de mortes no estado cresceu 183% nos últimos sete dias. O envio de oxigênio ao estado não está sendo suficiente para suprir a demanda, e o governo está transferindo pacientes a outros estados.

14/01/2021 16h12 - Atualizado há 11 meses



## Covid avança e indica colapso generalizado pelo Brasil

Especialistas veem cenário de colapso se aproximar, e pregam medidas restritivas em âmbito nacional para frear alta de casos e de mortes por covid

Por Leila Souza Lima e Ana Conceição — De São Paulo  
04/03/2021 05h00 - Atualizado há 9 meses



## Covid-19: Brasil bate recorde com 4.249 mortes registradas em 24 horas

Número de pessoas recuperadas subiu para 11.732.193



Publicado em 08/04/2021 - 19:21 Por Jesse Valente - Repórter da Agência Brasil - Brasil



Umhaçem P1 (Gama) surgiu no início de novembro de 2020, em Manaus

Variante Gama é mais agressiva, mas pode ser contida com vacina e lockdown

Maria Fernanda Ziegler  
Da Agência FAPESP  
06/08/2021 13h45

# Fim da primeira onda

- COVID-19 controlada: flexibilização do comércio, eleições municipais, relaxamento do uso de máscara e medidas de proteção, negacionismo...

## Covid-19: Manaus vive colapso com hospitais sem oxigênio, doentes levados a outros estados, cemitérios sem vagas e toque de recolher

A média móvel de mortes no estado cresceu 183% nos últimos sete dias. O envio de oxigênio ao estado não está sendo suficiente para suprir a demanda, e o governo está transferindo pacientes a outros estados.

14/01/2021 16h12 - Atualizado há 11 meses



## Covid avança e indica colapso generalizado pelo Brasil

Especialistas veem cenário de colapso se aproximar e pregam medidas restritivas em âmbito nacional para frear alta de casos e de mortes por covid

Por Leila Souza Lima e Ana Conceição — De São Paulo  
04/03/2021 05h00 - Atualizado há 9 meses



## Brasil deixou de comprar 27 milhões de doses até março por atraso em negociações

O governo federal demorou a assinar contratos com a Pfizer e o Instituto Butantan

## Covid-19: Brasil bate recorde com 4.249 mortes registradas em 24 horas

Número de pessoas recuperadas subiu para 11.732.193



Publicado em 08/04/2021 - 19:21 Por Jesse Valente - Repórter da Agência Brasil - Brasil

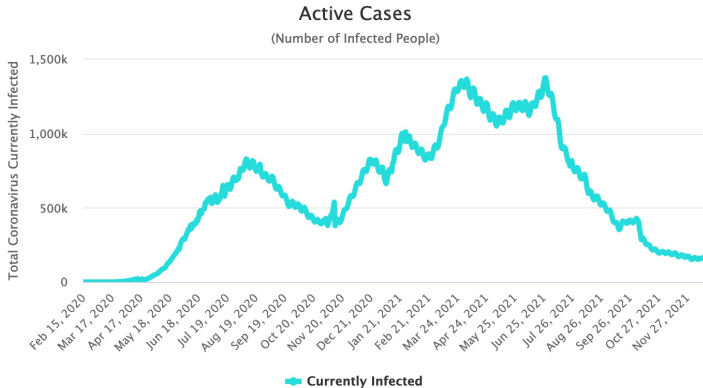


Umhagem P1 (Gama) surgiu no início de novembro de 2020, em Manaus

Variante Gama é mais agressiva, mas pode ser contida com vacina e lockdown

Maria Fernanda Ziegler  
Da Agência FAPESP  
06/08/2021 13:45

# Mais ondas...

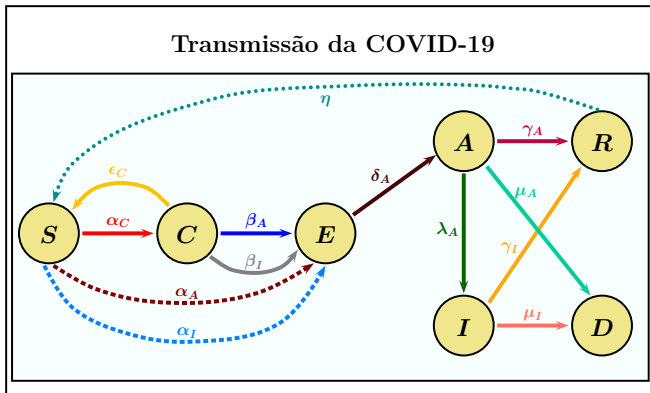


<https://www.worldometers.info/coronavirus/country/brazil/>

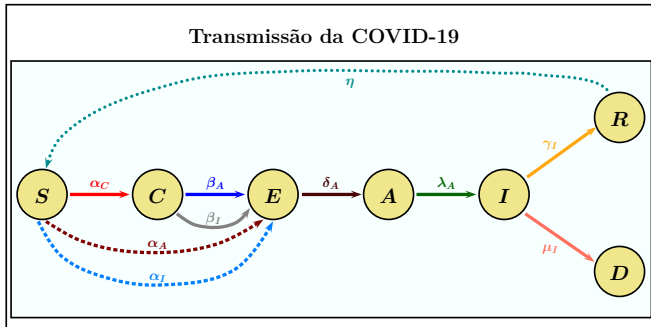
Dados de 20 de dezembro de 2021

- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica
- 3 COVID-19
- 4 Primeira Onda
- 5 Ondas Sucessivas**
- 6 Variante Ômicron
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras

# Modelo SCEAIRD

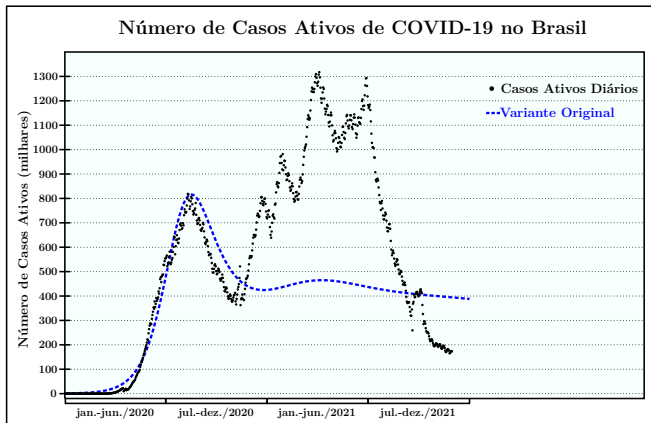


# Modelo SCEAIRD simplificado



Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

# Modelo SCEAIRD simplificado



Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

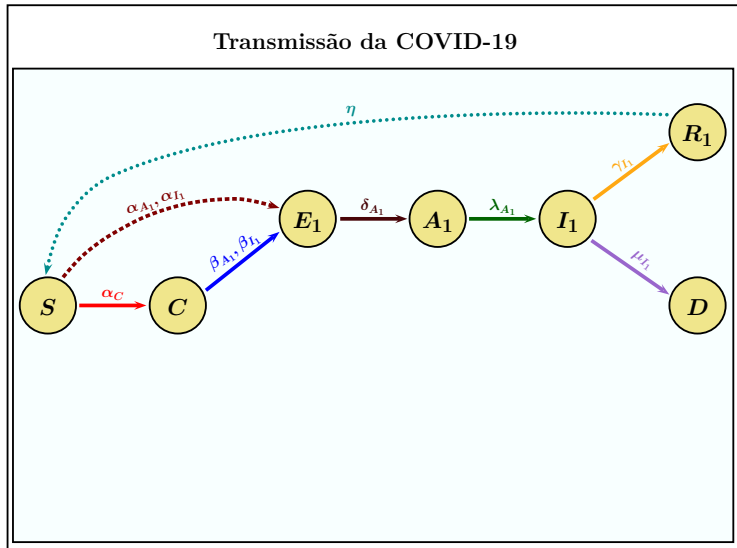


# Variante Gama

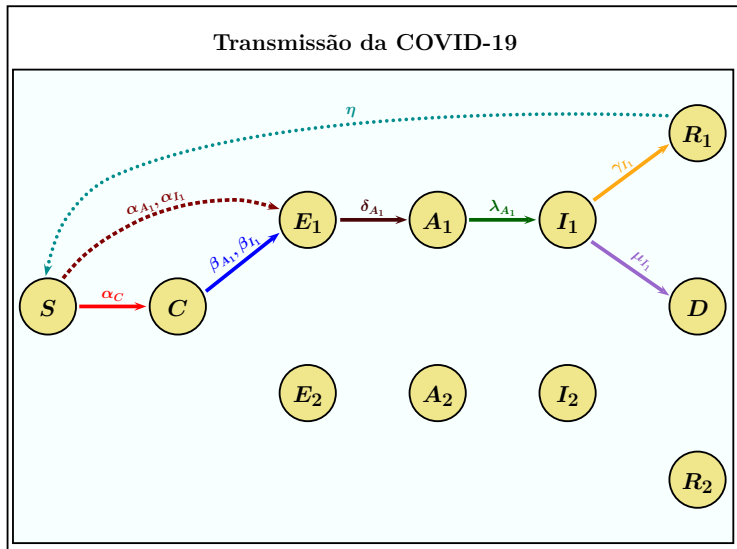
- Linhagem P.1
- Origem: Brasil
- Surgiu no início de novembro de 2020, em Manaus
- Mutações na proteína *spike* e em outras proteínas associadas à evasão da resposta imune
- Maior capacidade de transmissão e reinfecção
- Pode ser contida com vacina e *lockdown*
- Capacidade de neutralizar e escapar da atividade dos anticorpos circulantes

Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

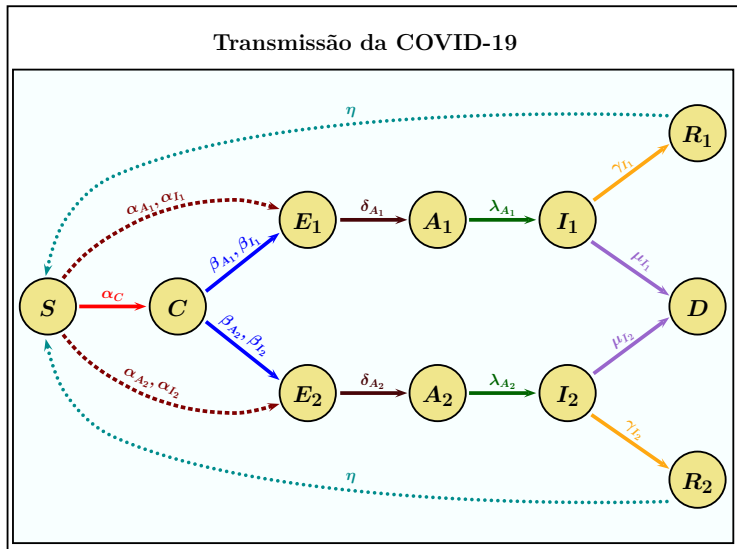
# Variante Gama



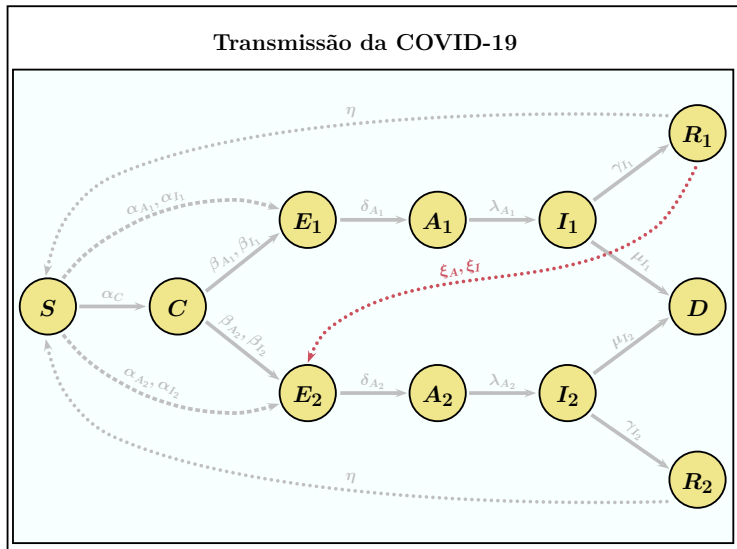
# Variante Gama



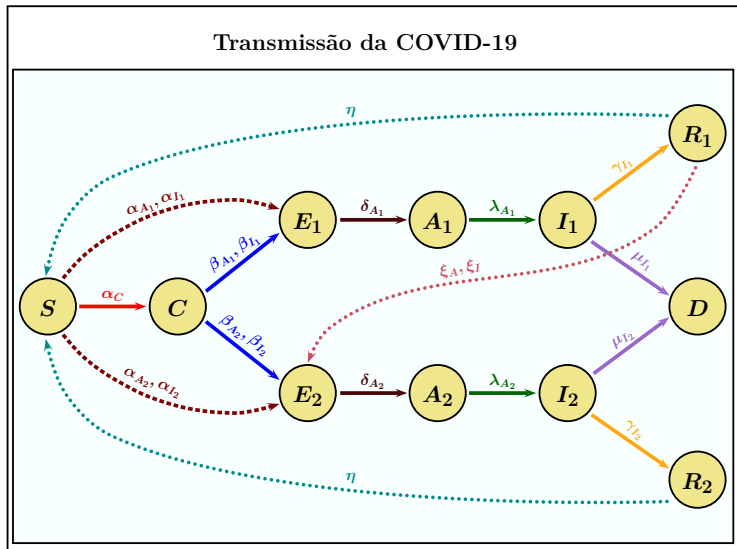
# Variante Gama



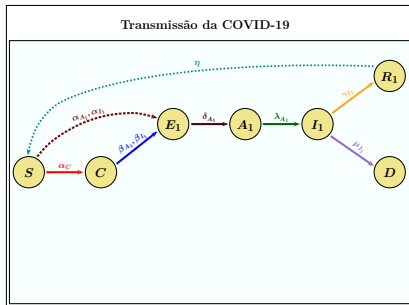
# Variante Gama



# Variante Gama



# Variante Gama

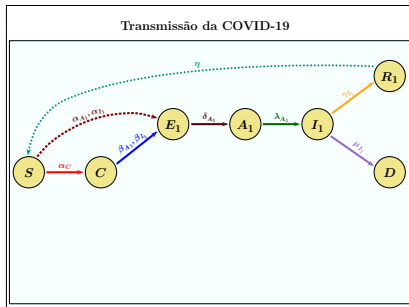


$$\frac{dS(t)}{dt} = \eta[R_1(t) + R_2(t)] - S(t)[\alpha_C + \alpha_{A_1} A_1(t) + \alpha_{I_1} I_1(t) + \alpha_{A_2} A_2(t) + \alpha_{I_2} I_2(t)]$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha_C S(t) - C(t)[\beta_{A_1} A_1(t) + \beta_{I_1} I_1(t) + \beta_{A_2} A_2(t) + \beta_{I_2} I_2(t)]$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \mu_{I_1} I_1(t) + \mu_{I_2} I_2(t)$$

# Variante Gama



## Variante Original

$$\frac{dE_1(t)}{dt} = \alpha_{A_1} S(t)A_1(t) + \alpha_{I_1} S(t)I_1(t) + \beta_{A_1} C(t)A_1(t) + \beta_{I_1} C(t)I_1(t) - \delta_{A_1} E_1(t)$$

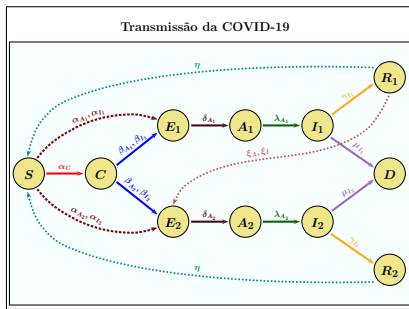
$$\frac{dA_1(t)}{dt} = \delta_{A_1} E_1(t) - \lambda_{A_1} A_1(t)$$

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = \lambda_{A_1} A_1(t) - \gamma_{I_1} I_1(t) - \mu_{I_1} I_1(t)$$

$$\frac{dR_1(t)}{dt} = \gamma_{I_1} I_1(t) - \eta R_1(t) - \xi_A R_1(t)A_2(t) - \xi_I R_1(t)I_2(t)$$



# Variante Gama



## Variante Gama

$$\frac{dE_2(t)}{dt} = S(t)[\alpha_{A_2} A_2(t) + \alpha_{I_2} I_2(t)] + C(t)[\beta_{A_2} A_2(t) + \beta_{I_2} I_2(t)] + R_1(t)[\xi_{A_2} A_2(t) + \xi_{I_2} I_2(t)] - \delta_{A_2} E_2(t)$$

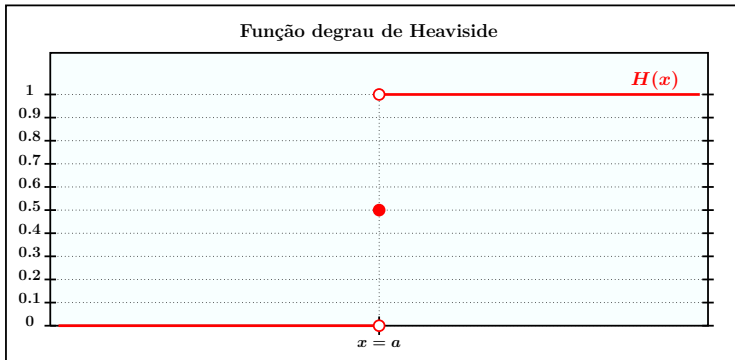
$$\frac{dA_2(t)}{dt} = \delta_{A_2} E_2(t) - \lambda_{A_2} A_2(t)$$

$$\frac{dI_2(t)}{dt} = \lambda_{A_2} A_2(t) - \gamma_{I_2} I_2(t) - \mu_{I_2} I_2(t)$$

$$\frac{dR_2(t)}{dt} = \gamma_{I_2} I_2(t) - \eta R_2(t)$$

# Função Degrau de Heaviside

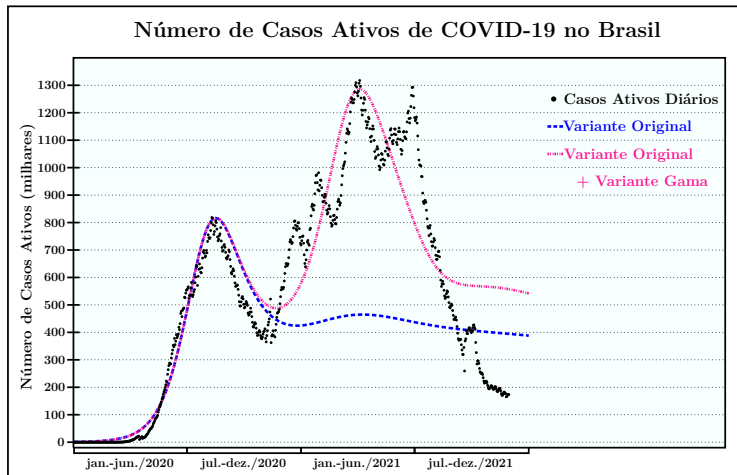
$$H(x - a) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{2}, & x = a \\ 1, & x > a \end{cases}$$



# Variante Gama

$$\begin{aligned}\frac{dS(t)}{dt} &= \eta[R_1(t) + R_2(t)] - S(t)[\alpha_C + \alpha_{A_1} A_1(t) + \alpha_{I_1} I_1(t) + \alpha_{A_2} A_2(t) + \alpha_{I_2} I_2(t)] \\ \frac{dC(t)}{dt} &= \alpha_C S(t) - C(t)[\beta_{A_1} A_1(t) + \beta_{I_1} I_1(t) + \beta_{A_2} A_2(t) + \beta_{I_2} I_2(t)] \\ \frac{dE_1(t)}{dt} &= \alpha_{A_1} S(t) A_1(t) + \alpha_{I_1} S(t) I_1(t) + \beta_{A_1} C(t) A_1(t) + \beta_{I_1} C(t) I_1(t) - \delta_{A_1} E_1(t) \\ \frac{dA_1(t)}{dt} &= \delta_{A_1} E_1(t) - \lambda_{A_1} A_1(t) \\ \frac{dI_1(t)}{dt} &= \lambda_{A_1} A_1(t) - \gamma_{I_1} I_1(t) - \mu_{I_1} I_1(t) \\ \frac{dR_1(t)}{dt} &= \gamma_{I_1} I_1(t) - \eta R_1(t) - \xi_A R_1(t) A_2(t) - \xi_I R_1(t) I_2(t) \\ \frac{dE_2(t)}{dt} &= H(t - \tau) S(t) [\alpha_{A_2} A_2(t) + \alpha_{I_2} I_2(t)] + H(t - \tau) C(t) [\beta_{A_2} A_2(t) + \beta_{I_2} I_2(t)] \\ &\quad + H(t - \tau) R_1(t) [\xi_A A_2(t) + \xi_I I_2(t)] - \delta_{A_2} H(t - \tau) E_2(t) \\ \frac{dA_2(t)}{dt} &= \delta_{A_2} H(t - \tau) E_2(t) - \lambda_{A_2} H(t - \tau) A_2(t) \\ \frac{dI_2(t)}{dt} &= \lambda_{A_2} H(t - \tau) A_2(t) - \gamma_{I_2} H(t - \tau) I_2(t) - \mu_{I_2} H(t - \tau) I_2(t) \\ \frac{dR_2(t)}{dt} &= \gamma_{I_2} H(t - \tau) I_2(t) - \eta H(t - \tau) R_2(t) \\ \frac{dD(t)}{dt} &= \mu_{I_1} I_1(t) + \mu_{I_2} H(t - \tau) I_2(t)\end{aligned}$$

# Variante Gama



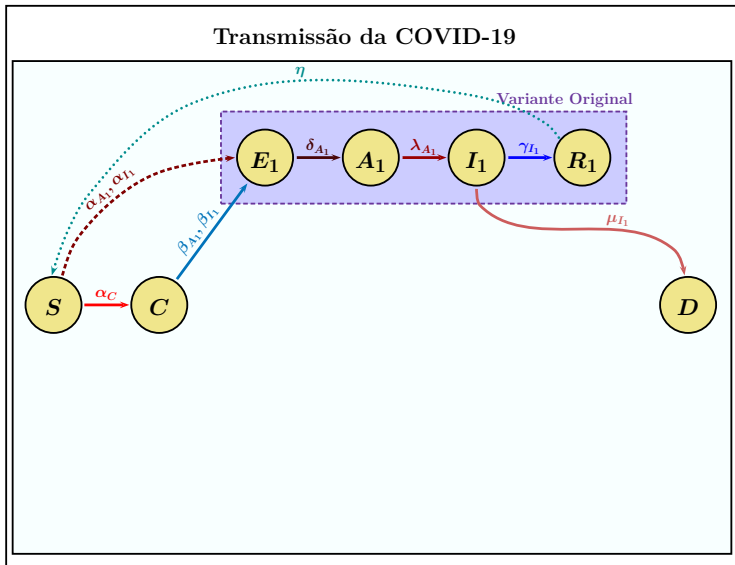
Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

# Variante Delta

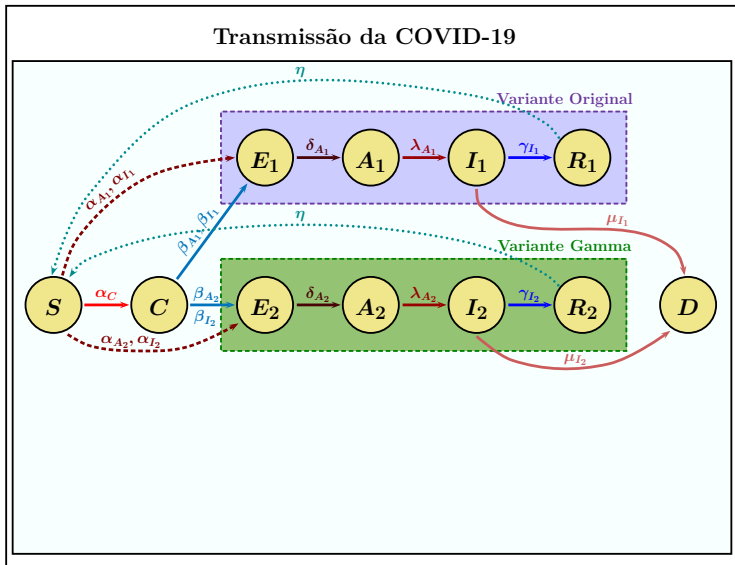
- Linhagem B.1.617
- Origem: Índia
- Identificada em dezembro de 2020 e os primeiros casos no Brasil foram confirmados em abril/maio de 2021
- Oito mutações na proteína *spike* e até 100% mais contagiosa que a cepa original do vírus
- Indivíduos infectados anteriormente com as variantes original e Gama são mais suscetíveis à reinfeção pela cepa Delta
- Os cuidados são os mesmos em relação às demais variantes

Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i11.50566

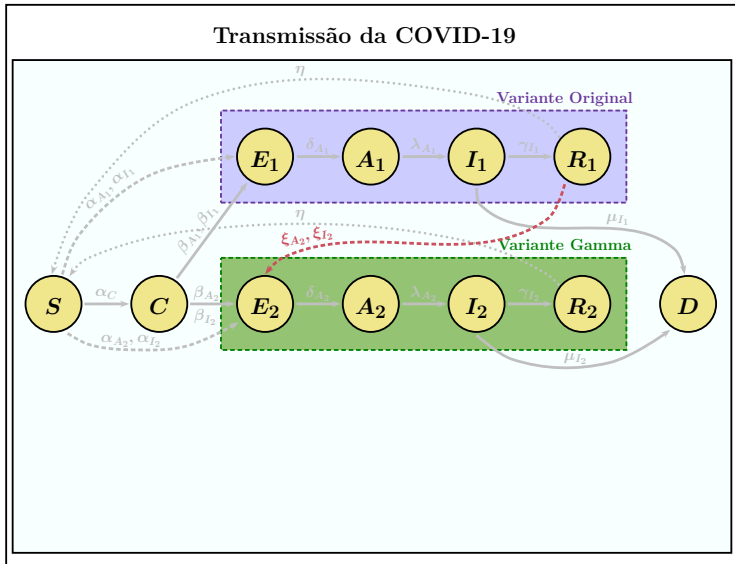
# Variantes Gama e Delta



# Variantes Gama e Delta

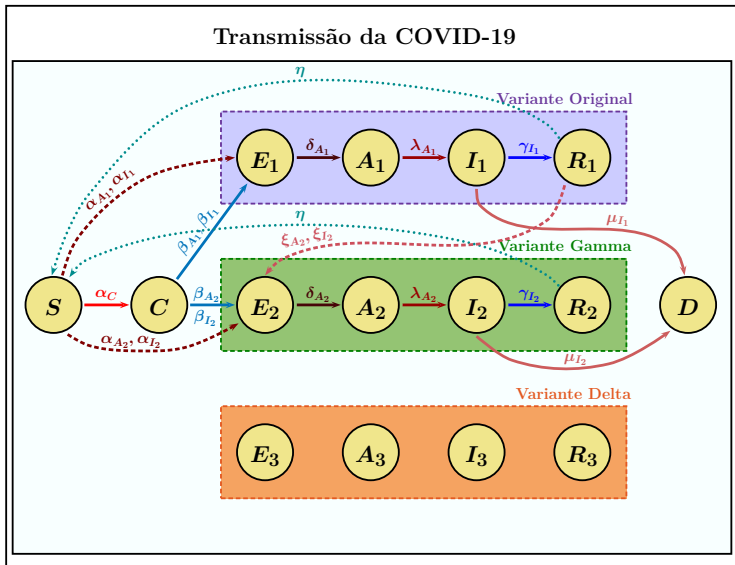


# Variantes Gama e Delta

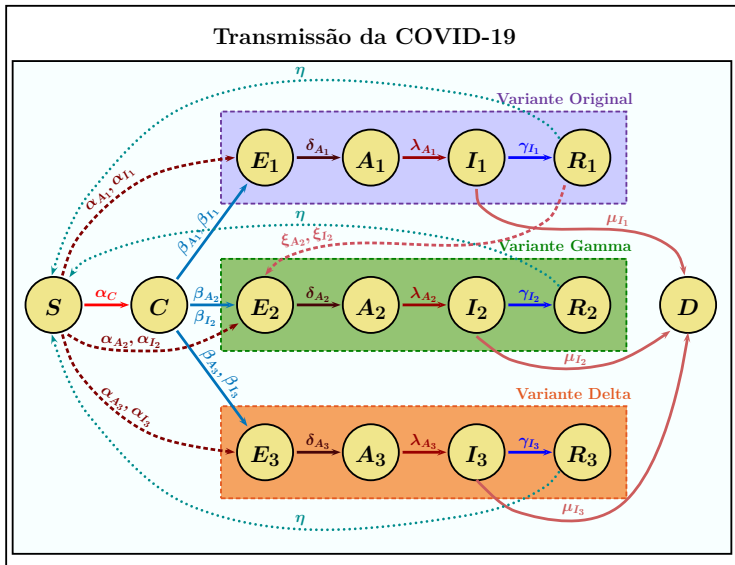




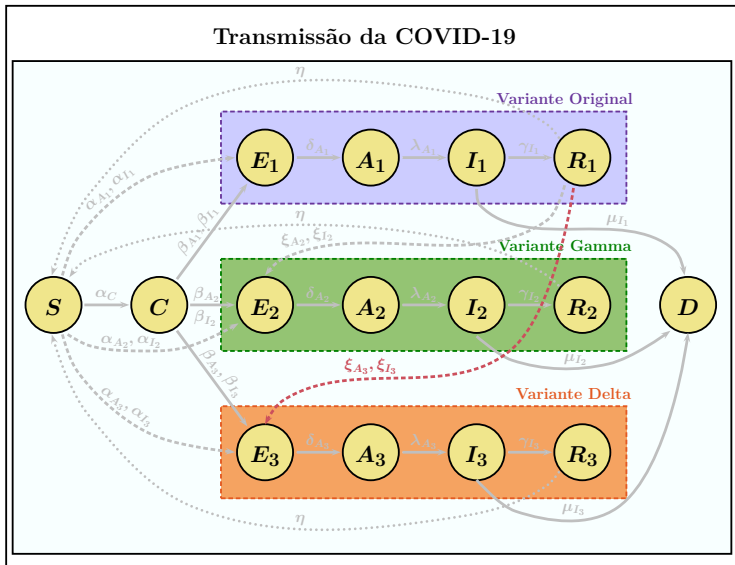
# Variantes Gama e Delta



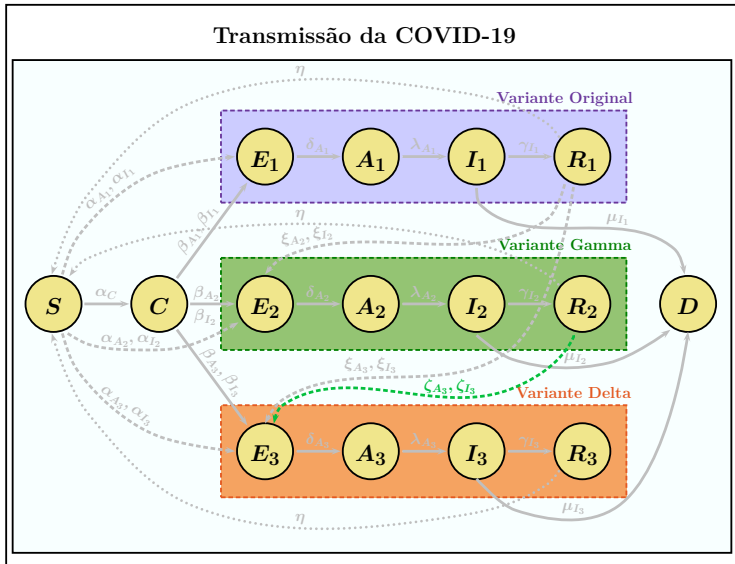
# Variantes Gama e Delta



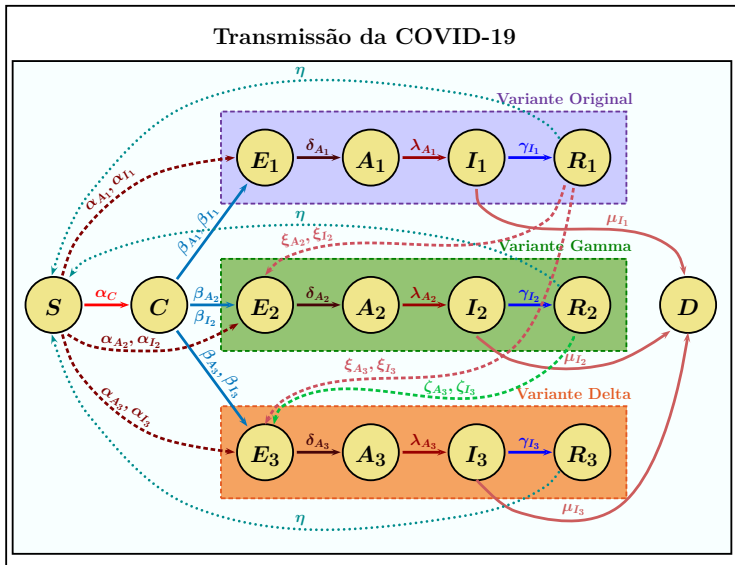
# Variantes Gama e Delta



# Variantes Gama e Delta



# Variantes Gama e Delta



# Variantes Gama e Delta

$$\frac{dS(t)}{dt} = \eta[R_1(t) + R_2(t) + R_3(t)] - S(t)[\alpha_C + \alpha_{A_1}A_1(t) + \alpha_{I_1}I_1(t) + \alpha_{A_2}A_2(t) + \alpha_{I_2}I_2(t) + \alpha_{A_3}A_3(t) + \alpha_{I_3}I_3(t)]$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha_C S(t) - C(t)[\beta_{A_1}A_1(t) + \beta_{I_1}I_1(t) + \beta_{A_2}A_2(t) + \beta_{I_2}I_2(t) + \beta_{A_3}A_3(t) + \beta_{I_3}I_3(t)]$$

$$\frac{dE_1(t)}{dt} = \alpha_{A_1}S(t)A_1(t) + \alpha_{I_1}S(t)I_1(t) + \beta_{A_1}C(t)A_1(t) + \beta_{I_1}C(t)I_1(t) - \delta_{A_1}E_1(t)$$

$$\frac{dA_1(t)}{dt} = \delta_{A_1}E_1(t) - \lambda_{A_1}A_1(t)$$

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = \lambda_{A_1}A_1(t) - \gamma_{I_1}I_1(t) - \mu_{I_1}I_1(t)$$

$$\frac{dR_1(t)}{dt} = \gamma_{I_1}I_1(t) - \eta R_1(t) - [\xi_{A_2}A_2(t) - \xi_{I_2}I_2(t) + \xi_{A_3}A_3(t) - \xi_{I_3}I_3(t)]R_1(t)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_2(t)}{dt} &= H(t - \tau_2)\{S(t)[\alpha_{A_2}A_2(t) + \alpha_{I_2}I_2(t)] + C(t)[\beta_{A_2}A_2(t) + \beta_{I_2}I_2(t)] \\ &\quad + R_1(t)[\xi_{A_2}A_2(t) + \xi_{I_2}I_2(t)] - \delta_{A_2}E_2(t)\} \end{aligned}$$

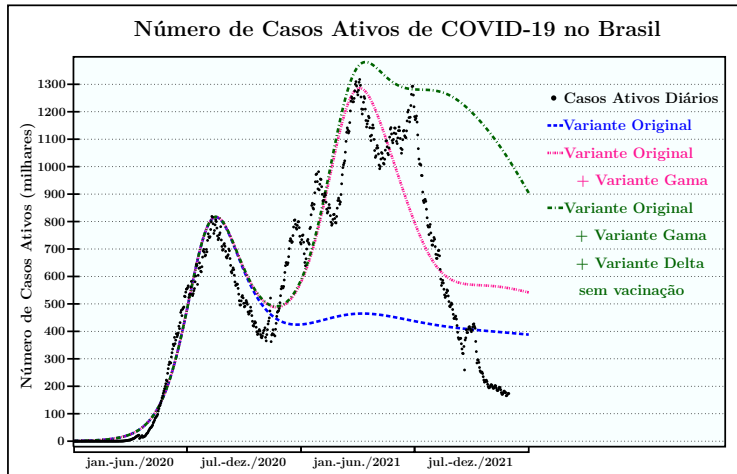
$$\frac{dA_2(t)}{dt} = H(t - \tau_2)[\delta_{A_2}E_2(t) - \lambda_{A_2}A_2(t)]$$

# Variantes Gama e Delta

$$\begin{aligned}\frac{dI_2(t)}{dt} &= H(t - \tau_2)[\lambda_{A_2} A_2(t) - \gamma_{I_2} I_2(t) - \mu_{I_2} I_2(t)] \\ \frac{dR_2(t)}{dt} &= H(t - \tau_2)\{\gamma_{I_2} I_2(t) - \eta R_2(t) - [\zeta_{A_3} A_3 + \zeta_{I_3} I_3]R_2(t)\} \\ \frac{dE_3(t)}{dt} &= H(t - \tau_3)\{S(t)[\alpha_{A_3} A_3(t) + \alpha_{I_3} I_3(t)] + C(t)[\beta_{A_3} A_3(t) + \beta_{I_3} I_3(t)] + [\xi_{A_3} A_3(t) + \xi_{I_3} I_3(t)]R_1(t) \\ &\quad + [\zeta_{A_3} A_3 + \zeta_{I_3} I_3]R_2(t) - \delta_{A_3} E_3(t)\} \\ \frac{dA_3(t)}{dt} &= H(t - \tau_3)[\delta_{A_3} E_3(t) - \lambda_{A_3} A_3(t)] \\ \frac{dI_3(t)}{dt} &= H(t - \tau_3)[\lambda_{A_3} A_3(t) - \gamma_{I_3} I_3(t) - \mu_{I_3} I_3(t)] \\ \frac{dR_3(t)}{dt} &= H(t - \tau_3)[\gamma_{I_3} I_3(t) - \eta R_3(t)] \\ \frac{dD(t)}{dt} &= \mu_{I_1} I_1(t) + H(t - \tau_2)\mu_{I_2} I_2(t) + H(t - \tau_3)\mu_{I_3} I_3(t).\end{aligned}$$

Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

# Variantes Gama e Delta



Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

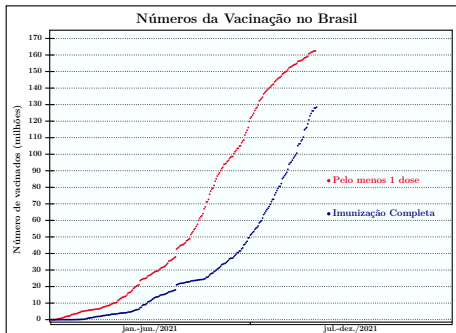


# Vacinação

- Início: 18 de Janeiro de 2021
- CoronaVac<sup>®</sup> - Sinovac e Instituto Butantan
- ChAdOx1-S nCoV-19<sup>®</sup> - AstraZeneca e Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)
- Comirnaty<sup>®</sup> - Pfizer e BioNTech
- Janssen Ad26.COV2.S<sup>®</sup> - Johnson & Johnson

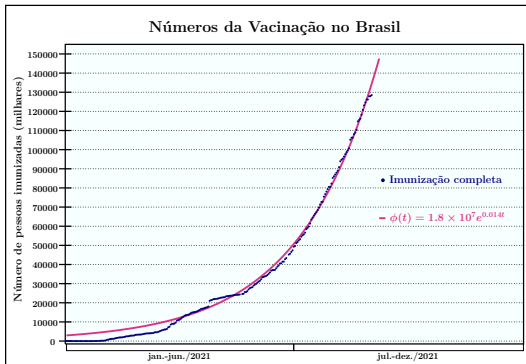
# Vacinação

- Início: 18 de Janeiro de 2021
- CoronaVac<sup>®</sup> - Sinovac e Instituto Butantan
- ChAdOx1-S nCoV-19<sup>®</sup> - AstraZeneca e Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)
- Comirnaty<sup>®</sup> - Pfizer e BioNTech
- Janssen Ad26.COV2.S<sup>®</sup> - Johnson & Johnson

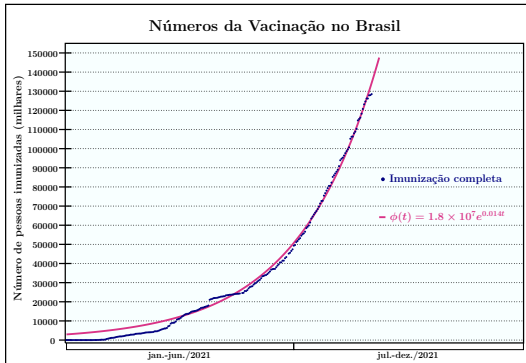


Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

# Vacinação



# Vacinação

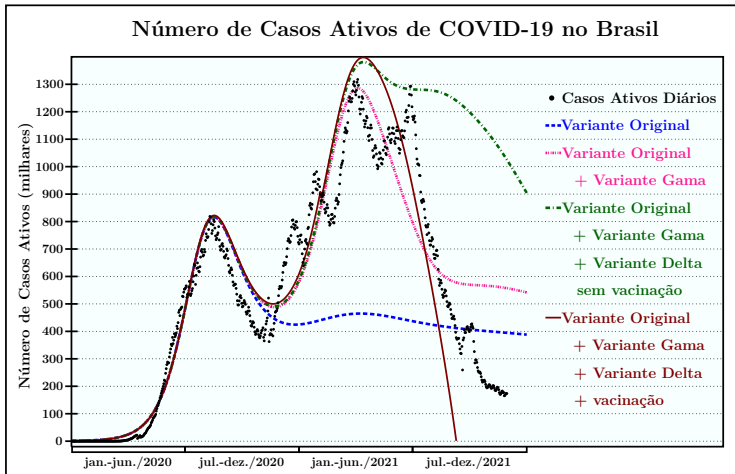


$$\psi(t) = H(t - 400)e^{\frac{\phi(t)}{N}}$$

Distribuição das vacinas e eficácia média  $e = 75.3\%$

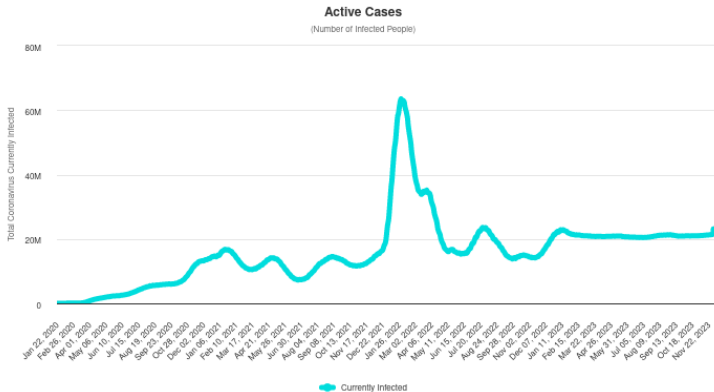
Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

# Variantes Gama e Delta com Vacinação



Lima, Silva e Meyer, (2022) *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566

# Final da Pandemia?



<https://www.worldometers.info/coronavirus/worldwide-graphs/>

Dados de 18 de dezembro de 2023

- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica
- 3 COVID-19
- 4 Primeira Onda
- 5 Ondas Sucessivas
- 6 Variante Ômicron**
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras

# Variante Ômicron

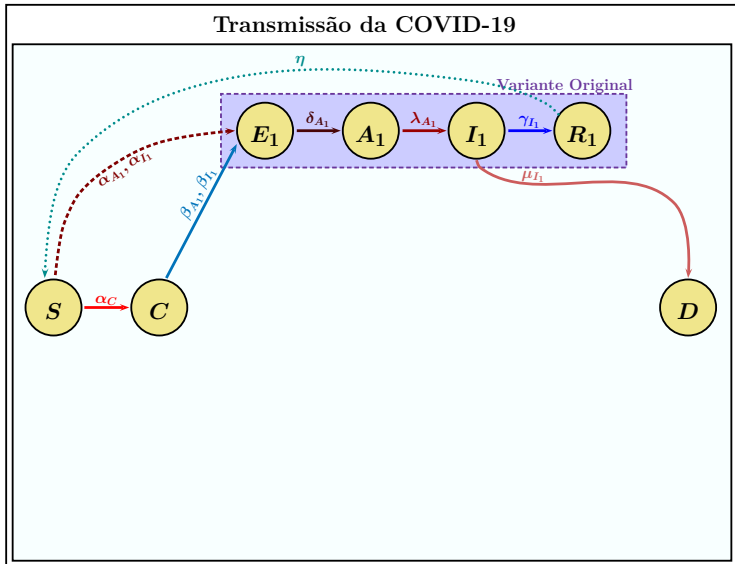
- Linhagem B.1.1.529
- Origem: África do Sul
- Surgiu no final de 2021
- Mutações na proteína *spike*
- Mais resistente às vacinas
- Infecta mais rapidamente os tecidos do trato respiratório superior em vez dos pulmões
- Facilidade de disseminação
- Sintomas mais leves
- Menor taxa de detecção



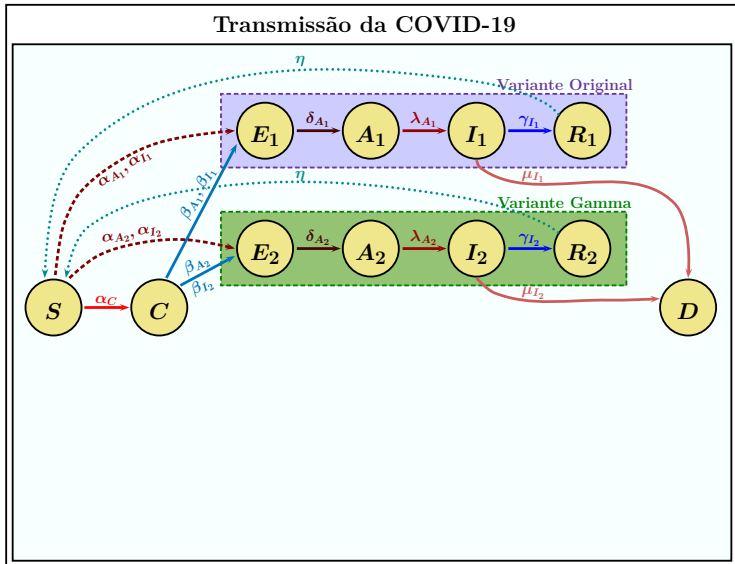
# Variante Ômicron

- Continuamos considerando a circulação das variantes original, Gama e Delta
- Vacinação contra as variantes original, Gama e Delta
- Acréscimo das seguintes classes de indivíduos
  - $E_4(t)$ : indivíduos Expostos à variante Ômicron
  - $A_4(t)$ : indivíduos que contraíram a variante Ômicron, mas não manifestam sintomas
  - $I_4(t)$ : indivíduos infectados pela variante Ômicron e que testaram positivo para a COVID-19
  - $R_4(t)$ : indivíduos que adquiriram resistência, sendo essa temporária
- Os indivíduos resistentes às variantes anteriores, podem ser infectados pela Ômicron

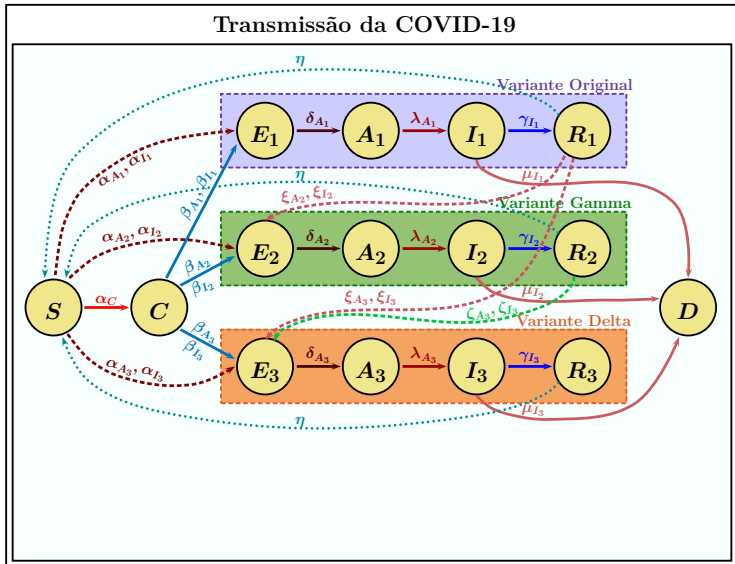
# Variante Ômicron



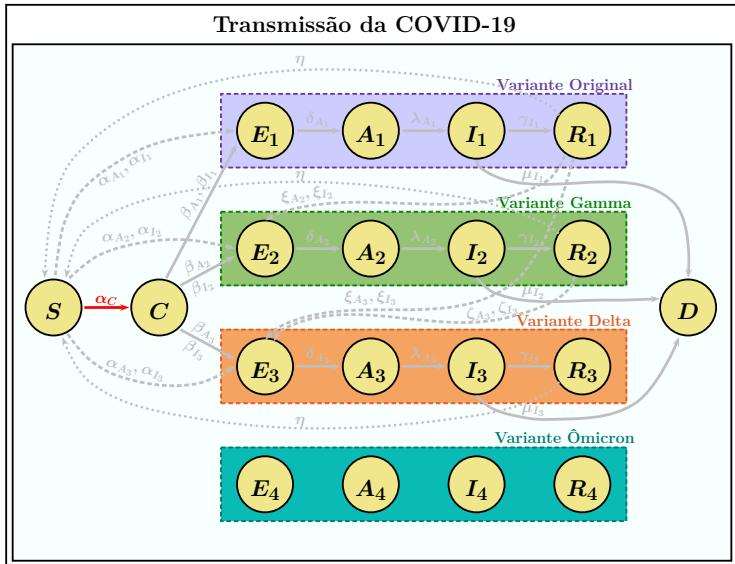
# Variante Ômicron



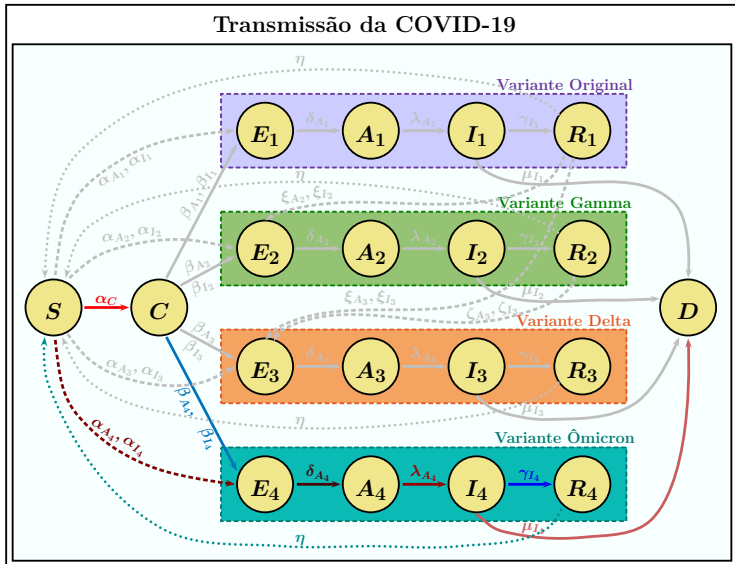
# Variante Ômicron



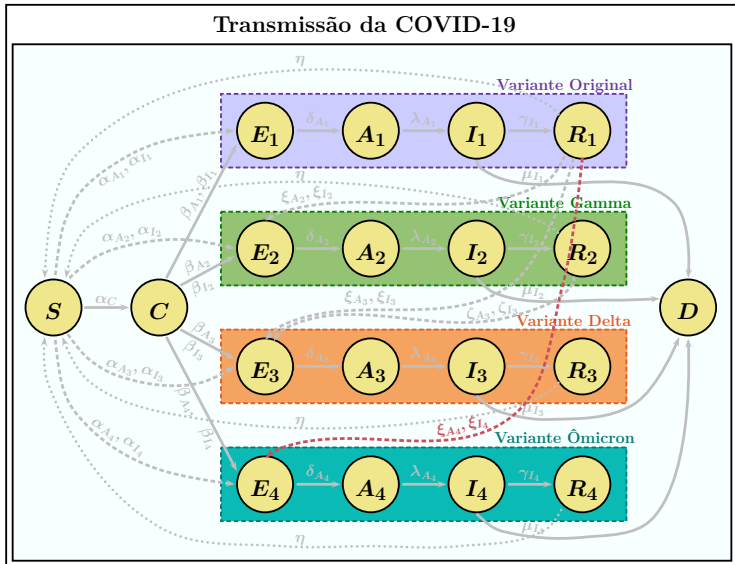
# Variante Ômicron



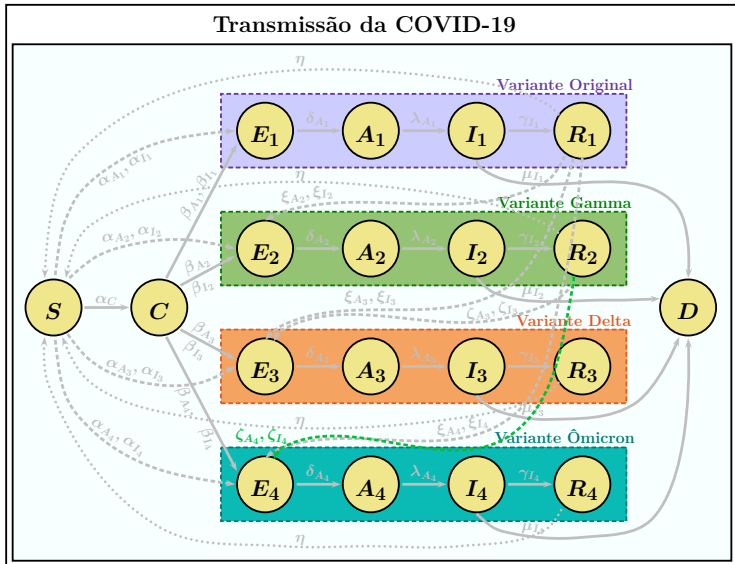
# Variante Ômicron



# Variante Ômicron

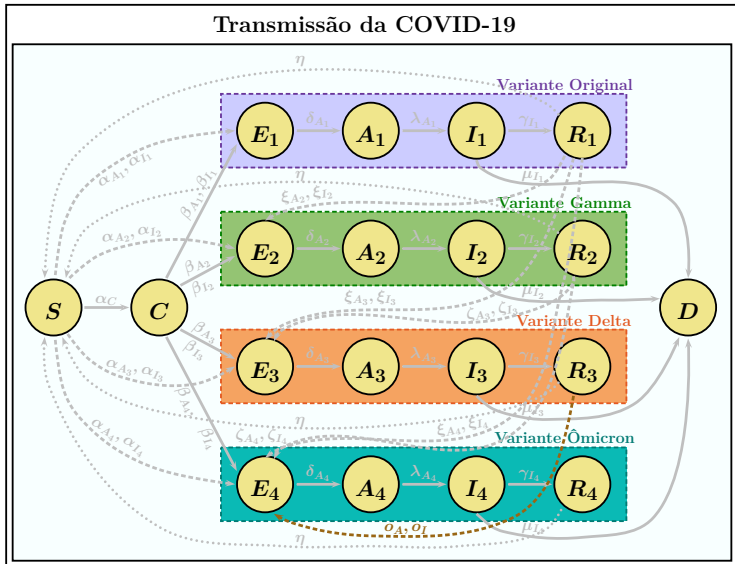


# Variante Ômicron

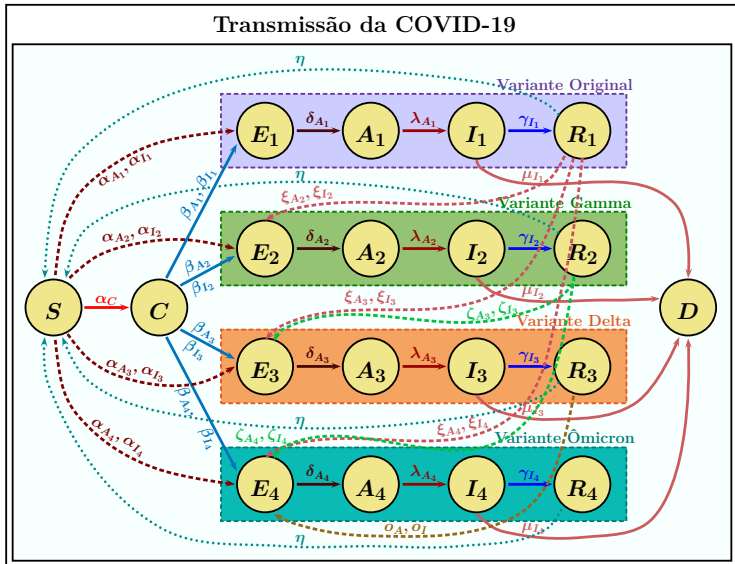




# Variante Ômicron



# Variante Ômicron



# Variante Ômicron

$$\begin{aligned}\frac{dS(t)}{dt} &= \eta[R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t)] - S(t)[\alpha_C + \alpha_{A_1} A_1(t) + \alpha_{I_1} I_1(t) \\ &\quad + \alpha_{A_2} A_2(t) + \alpha_{I_2} I_2(t) + \alpha_{A_3} A_3(t) + \alpha_{I_3} I_3(t) + \alpha_{A_4} A_4(t) + \alpha_{I_4} I_4(t)] \\ \frac{dC(t)}{dt} &= \alpha_C S(t) - C(t)[\beta_{A_1} A_1(t) + \beta_{I_1} I_1(t) + \beta_{A_2} A_2(t) + \beta_{I_2} I_2(t) + \beta_{A_3} A_3(t) \\ &\quad + \beta_{I_3} I_3(t) + \beta_{A_4} A_4(t) + \beta_{I_4} I_4(t)] \\ \frac{dE_1(t)}{dt} &= \alpha_{A_1} S(t) A_1(t) + \alpha_{I_1} S(t) I_1(t) + \beta_{A_1} C(t) A_1(t) + \beta_{I_1} C(t) I_1(t) - \delta_{A_1} E_1(t) \\ \frac{dA_1(t)}{dt} &= \delta_{A_1} E_1(t) - \lambda_{A_1} A_1(t) \\ \frac{dI_1(t)}{dt} &= \lambda_{A_1} A_1(t) - \gamma_{I_1} I_1(t) - \mu_{I_1} I_1(t) \\ \frac{dR_1(t)}{dt} &= \gamma_{I_1} I_1(t) - \eta R_1(t) \\ &\quad - [\xi_{A_2} A_2(t) + \xi_{I_2} I_2(t) + \xi_{A_3} A_3(t) + \xi_{I_3} I_3(t) + \xi_{A_4} A_4(t) + \xi_{I_4} I_4(t)] R_1(t)\end{aligned}$$

# Variante Ômicron

$$\frac{dE_2(t)}{dt} = H(t - \tau_2)\{S(t)[\alpha_{A_2} A_2(t) + \alpha_{I_2} I_2(t)] + C(t)[\beta_{A_2} A_2(t) + \beta_{I_2} I_2(t)] \\ + R_1(t)[\xi_{A_2} A_2(t) + \xi_{I_2} I_2(t)] - \delta_{A_2} E_2(t)\}$$

$$\frac{dA_2(t)}{dt} = H(t - \tau_2)[\delta_{A_2} E_2(t) - \lambda_{A_2} A_2(t)]$$

$$\frac{dI_2(t)}{dt} = H(t - \tau_2)[\lambda_{A_2} A_2(t) - \gamma_{I_2} I_2(t) - \mu_{I_2} I_2(t)]$$

$$\frac{dR_2(t)}{dt} = H(t - \tau_2)\{\gamma_{I_2} I_2(t) - \eta R_2(t) - [\zeta_{A_3} A_3 + \zeta_{I_3} I_3 + \zeta_{A_4} A_4 + \zeta_{I_4} I_4]R_2(t)\}$$

# Variante Ômicron

$$\frac{dE_3(t)}{dt} = H(t - \tau_3)\{S(t)[\alpha_{A_3}A_3(t) + \alpha_{I_3}I_3(t)] + C(t)[\beta_{A_3}A_3(t) + \beta_{I_3}I_3(t)] \\ + [\xi_{A_3}A_3(t) + \xi_{I_3}I_3(t)]R_1(t) + [\zeta_{A_3}A_3 + \zeta_{I_3}I_3]R_2(t) - \delta_{A_3}E_3(t)\}$$

$$\frac{dA_3(t)}{dt} = H(t - \tau_3)[\delta_{A_3}E_3(t) - \lambda_{A_3}A_3(t)]$$

$$\frac{dI_3(t)}{dt} = H(t - \tau_3)[\lambda_{A_3}A_3(t) - \gamma_{I_3}I_3(t) - \mu_{I_3}I_3(t)]$$

$$\frac{dR_3(t)}{dt} = H(t - \tau_3)\{\gamma_{I_3}I_3(t) - [\eta + o_A + o_I]R_3(t)\}$$

# Variante Ômicron

$$\begin{aligned}\frac{dE_4(t)}{dt} &= H(t - \tau_4)\{S(t)[\alpha_{A_4} A_4(t) + \alpha_{I_4} I_4(t)] + C(t)[\beta_{A_4} A_4(t) + \beta_{I_4} I_4(t)] \\ &\quad + [\xi_{A_4} A_4(t) + \xi_{I_4} I_4(t)]R_1(t) + [\zeta_{A_4} A_4 + \zeta_{I_4} I_4]R_2(t) + [o_A A_4 + o_I I_4]R_3(t) - \delta_{A_4} E_4(t)\}\end{aligned}$$

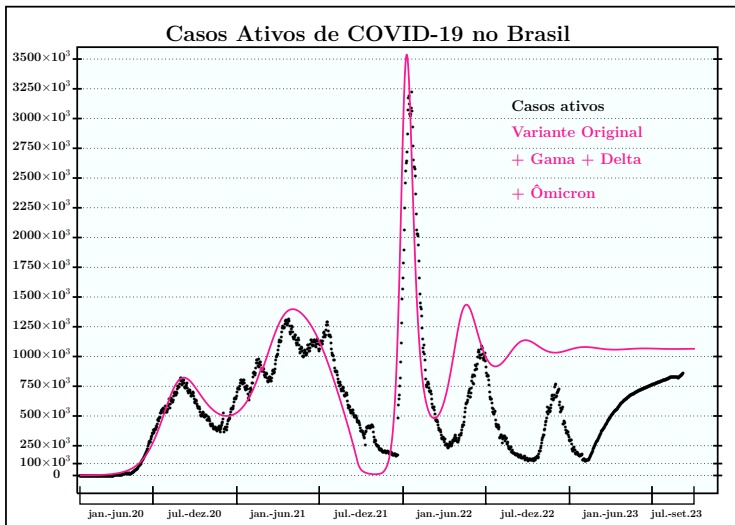
$$\frac{dA_4(t)}{dt} = H(t - \tau_4)[\delta_{A_4} E_4(t) - \lambda_{A_4} A_4(t)]$$

$$\frac{dI_4(t)}{dt} = H(t - \tau_4)[\lambda_{A_4} A_4(t) - \gamma_{I_4} I_4(t) - \mu_{I_4} I_4(t)]$$

$$\frac{dR_4(t)}{dt} = H(t - \tau_4)[\gamma_{I_4} I_4(t) - \eta R_4(t)]$$

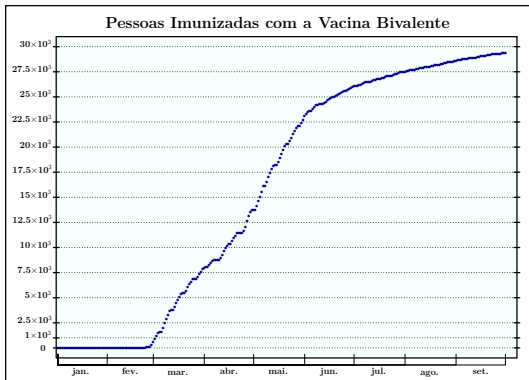
$$\frac{dD(t)}{dt} = \mu_{I_1} I_1(t) + H(t - \tau_2)\mu_{I_2} I_2(t) + H(t - \tau_3)\mu_{I_3} I_3(t) + H(t - \tau_4)\mu_{I_4} I_4(t)$$

# Variante Ômicron



# Vacina Bivalente

- Pfizer/BioNTech Comirnaty<sup>®</sup> Bivalente
- RNA mensageiro foi modificado de maneira a permitir uma expressão da forma transitória do antígeno S do vírus SARS-CoV-2
- Início da vacinação em janeiro de 2022



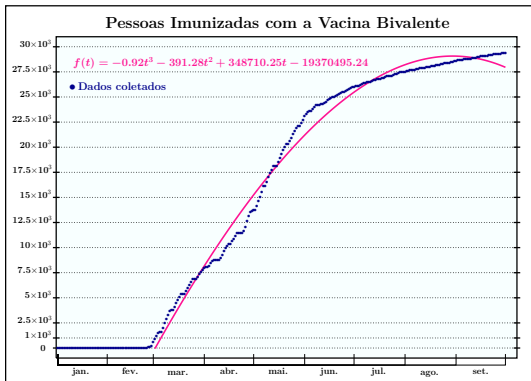


# Vacina Bivalente

- Ajuste polinomial

$$f(t) = -0.92t^3 - 391.28t^2 + 348710.25t - 19370495.24$$

- $f(t)$ : número de pessoas imunizadas
- Dia inicial: 56 - curva tem o seu crescimento expressivo



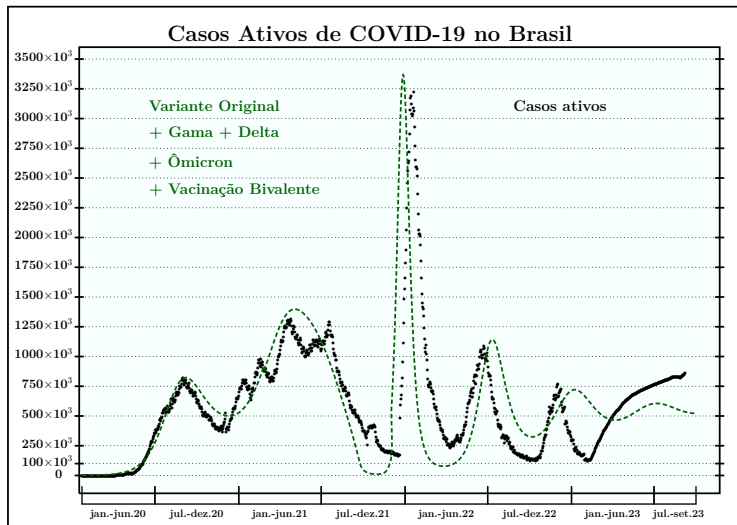
# Vacina Bivalente

- Redução do número dos infectados pela variante Ômicron

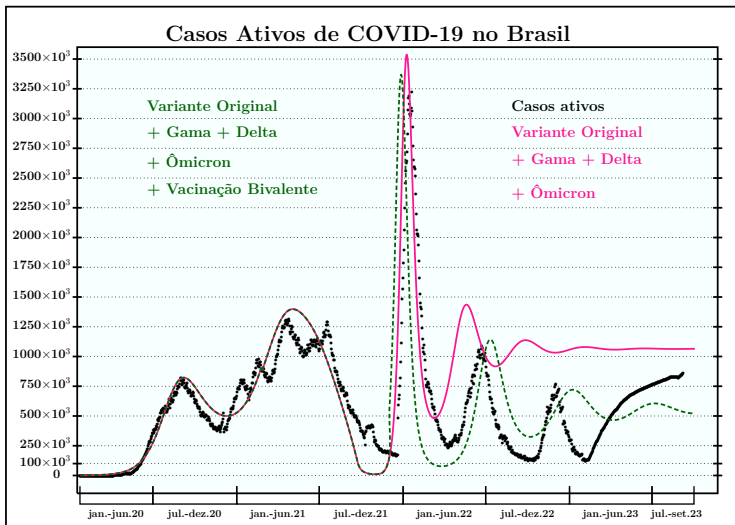
$$\phi(t) = H(t - 730)e^{-\frac{f(t)}{N}}$$

- $H(t - \tau)$ : função degrau de Heaviside
- $\tau = 730$ , corresponde ao dia 01/01/2022
- Eficácia da vacina:  $e = 95\%$
- $f(t)$ : função que descreve a curva completa de imunização
- $N$ : população total do Brasil

# Variante Ômicron



# Variante Ômicron

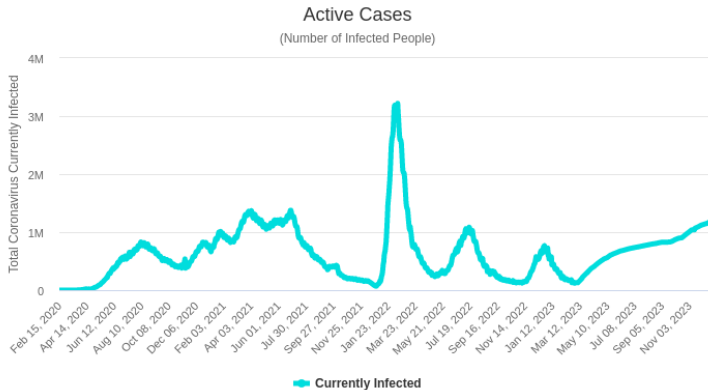


- 1 Modelagem Matemática e Modelos de crescimento
- 2 Modelagem Epidemiológica
- 3 COVID-19
- 4 Primeira Onda
- 5 Ondas Sucessivas
- 6 Variante Ômicron
- 7 Conclusões e Perspectivas Futuras**

# Conclusões

- Comportamento qualitativo das curvas
- Previsão de ondas sucessivas
- Vantagem da função de Heaviside
- Modelos inéditos que descrevem as ondas no Brasil
- Eficiência da vacinação na redução dos casos

# E de agora em diante...



<https://www.worldometers.info/coronavirus/country/brazil/>

Dados de 18 de dezembro de 2023

# Perspectivas Futuras

- Novas variantes
- Vacinação periódica da população - segunda dose da Bivalente (dezembro 2023)
- Simulações de cenários de vacinação
- Dados “reais” da pandemia - subnotificação e autotestes
- Modelos intracelulares
- Perspectivas de uma COVID-19 endêmica
- Modelagem Fracionária da COVID-19



# Referências

- J.F.C.A. Meyer e **M. Lima** (2022). Relevant mathematical modelling efforts for understanding COVID-19 dynamics: An educational challenge. *ZDM – Mathematics Education*, 54(7):1-14, doi:10.1007/s11858-022-01447-2
- **M. Lima** A. Silva e J.F.C.A. Meyer (2023). Mathematical models and simulations of different scenarios of COVID-19 in Brazil. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* 30(1):87–111, doi:10.15517/rmta.v30i1.50566
- **M. Lima** A. Silva e J.F.C.A. Meyer (2022). Mathematical Modelling and Simulations of the COVID-19 in Brazil. *13th International Conference Dynamical Systems Applied to Biology and Natural Sciences (DSABNS)*, Bilbao - Espanha, p. 320-321
- J.F.C.A. Meyer, **M. Lima**, et al. (2021). Different approaches to the modelling of COVID-19. *Trends in Computational and Applied Mathematics*, 22(4):515-531, doi:10.5540/tcam.2021.022.04.00515
- C.C. Morillo, A. Gois, C. Kunz, B. Laiate, **M. Lima**, F. Longo, J. F. C. A Meyer (2021). Diferentes enfoques para modelamiento matemático de COVID-19. *Modelacion Matematica IV*, p. 59-75, ISBN:978-607-98020-7-3

# Muito Obrigada!

