



**Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Matemática**

**Bacharelado em Estatística**

**EPIDEMIOLOGIA DA PROPAGAÇÃO  
DE DOENÇAS POR SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL: COVID-19**

**Luiz Almeida da Silva**

**Uberlândia-MG**

**2023**

**Luiz Almeida da Silva**

**EPIDEMIOLOGIA DA PROPAGAÇÃO  
DE DOENÇAS POR SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL: COVID-19**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Estatística como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Estatística.

Orientador: Professor Doutor Leandro Alves Pereira (FAMAT)

**Uberlândia-MG  
2023**



**Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Matemática**

**Coordenação do Curso de Bacharelado em Estatística**

A banca examinadora, conforme abaixo assinado, certifica a adequação deste trabalho de conclusão de curso para obtenção do grau de Bacharel em Estatística.

Uberlândia, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Professor Doutor Leandro Alves Pereira (FAMAT)

---

Professor Doutor José Waldemar da Silva (FAMAT)

---

Professor Doutor Alexandre de Assis Bueno (UFCAT)

**Uberlândia-MG  
2023**

# AGRADECIMENTOS

A vida é uma dádiva Divina que nos surpreende a cada dia, dando-nos a oportunidade de experienciar diversificadas formas do conhecimento, os quais em conjunto, dá-nos a possibilidade de tentar entender o comportamento dinâmico do universo. Essa foi a minha busca com a Estatística, compreender o movimento infinito e dinâmico do mundo das coisas possíveis e previsíveis por meio de técnicas e procedimentos.

Quero agradecer primeiramente a Deus, por me dar a vida e me permitir trilhar, levantar à cada queda, recomeçar e chegar ao final.

Agradecer e dedicar mais essa etapa da minha vida à minha mãe Esmeralda, joia rara de coração singelo e forte que sempre me motivou a não desistir nunca dos sonhos, pois segundo ela: "Deus não dá uma cruz maior do que os seus ombros podem suportar".

Agradecer à minha Esposa e minhas filhas, que nunca mediram esforços para acreditar que tudo é possível para aquele que crê e busca, com vocês cheguei até aqui.

Agradeço também ao professor Doutor José Waldemar, um professor cuja humanidade e profissionalismo é raridade no contexto educacional das ciências exatas.

Agradeço ao Professor Doutor Leandro, um Orientador/Estatístico/Humano "fora da curva", que muito contribuiu para a abertura do conhecimento de simulação e autômatos celulares.

# RESUMO

A evolução da pandemia da COVID-19 trouxe-nos grandes desafios para o contexto epidemiológico das cidades, tendo em vista a necessidade de adequações para proteção à saúde da população e, em paralelo, à manutenção de atividades comerciais para subsistência dos postos de trabalho. Para a área da saúde, entende-se que um dos maior desafio foi gerenciar os leitos hospitalares para as ocorrências que demandaram internação hospitalar, cujos pacientes evoluíam para casos graves. O uso da máscara facial, o isolamento social e a redução de mobilidade foram as primeiras medidas de contenção da disseminação viral antes da construção da vacina, a qual mudou o cenário epidemiológico após a sua inserção, ainda que em processo lento no início. Tendo em vista a necessidade de se estudar a propagação da COVID-19 após a inserção da vacina na comunidade, bem como a necessidade de conhecer cenários onde a combinação do uso de máscara facial com a vacina podem contribuir com as autoridades para planejamentos e construção de políticas públicas de saúde, o presente trabalho foi construído. Utilizou-se uma adaptação de um modelo SIRS e realizou-se 16 simulações para diferentes cenários e probabilidades com combinações entre o uso de máscaras e de vacinas. Das simulações foram analisadas as contaminações diárias, as internações diárias em decorrência da infecção e a média móvel quinzenal de mortes decorrentes. Observou-se que o uso de máscara facial isoladamente cumpre um papel primordial para a contenção da disseminação viral, mas a melhor estratégia observada foi a combinação entre máscara e vacina. O uso do cenário de 50% de cobertura vacinal associado à 10% de usuários de máscara, produziu efeito epidemiológico similar à 10% de cobertura vacinal e 50% de usuários de máscara, o que demonstra que a utilização da máscara facial poderia ter sido utilizada fortemente para redução das contaminações quando as vacinas ainda estavam em produção e a cobertura vacinal da população era baixa, reduzindo as contaminações, internações e mortes. Conclui-se que o comportamento social na utilização de máscaras de forma e proporção corretas, bem como a adesão às campanhas de vacinação são fatores primordiais para a redução da circulação do vírus. A utilização do autômato celular é uma ferramenta estatística que pode auxiliar no controle de dispersão de doenças infectocontagiosas, em específico a COVID-19, contribuindo, por meio de simulações de diferentes cenários, na construção de informações que podem subsidiar as autoridades públicas para planejamento de intervenções tanto para o cenário atual como para futuras epidemias/pandemias.

**Palavras-chave:** Epidemiologia, Autômato Celular, COVID-19.

# ABSTRACT

The evolution of the COVID-19 pandemic has brought great challenges to the epidemiological context. of the cities, in view of the need for adaptations to protect the health of the population and in parallel the maintenance of commercial activities to maintain subsistence. jobs. For the health area, the biggest challenge was managing the beds hospitals for occurrences that required hospitalization. the use of the mask facial, social isolation and flow reduction were the first measures to contain the viral dissemination before the construction of the vaccine, which changed the epidemiological scenario after the its insertion, albeit in a slow process at first. In view of the need to study the spread of COVID-19 after the introduction of the vaccine in the community, as well as the need to know scenarios where the combination of the use of a face mask and the combination with the vaccine can contribute with the authorities for planning and construction of public policies of health, the present work was built an adaptation of a SIRS model was used and 16 simulations were performed for different scenarios and probabilities with combinations between the use of masks and vaccines. From the simulations, the daily contaminations, the daily hospitalizations due to the infection and the fortnightly moving average of deaths due totes. It was observed that the use of a face mask alone plays a key role in containment of viral dissemination, but the best strategy observed was the combination of mask and vaccine. The use of the scenario of 50% vaccination coverage associated with 10% users wearing a mask, produced an epidemiological effect similar to 10% vaccination coverage and 50% users. masks, which demonstrates that the use of a face mask could have been used strongly to reduce contamination when vaccines were still in production and the vaccination coverage of the population was low, reducing contamination, hospitalizations and deaths. It is concluded that social behavior in the use of masks in a correct shape and proportion lines, as well as adherence to vaccination campaigns are key factors for reducing of virus circulation. The use of the cellular automaton is a statistical tool that can help control the spread of infectious and contagious diseases, specifically COVID-19. 19, contributing, through simulations of different scenarios, in the construction of information that can subsidize public authorities for planning interventions both for the current scenario and for future epidemics/pandemics.

**Keywords:** Epidemiology, Cellular Automata, COVID-19.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	<b>I</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>II</b>
<b>Lista de Abreviações e Símbolos</b>	<b>III</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Evolução epidemiológica das doenças . . . . .	1
1.2 Objetivo . . . . .	4
1.3 Justificativa . . . . .	4
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>5</b>
2.1 Modelos SIR . . . . .	5
2.2 Autômatos Celulares . . . . .	6
2.3 Doenças Transmissíveis por vírus . . . . .	7
2.4 Pandemia da COVID-19 . . . . .	9
<b>3 Metodologia</b>	<b>10</b>
<b>4 Resultados</b>	<b>16</b>
<b>5 Conclusões</b>	<b>28</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>29</b>

---

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Vizinhança de Von Neuman (a) e Moore (b) . . . . .	7
3.1	Mecanismo de Transição . . . . .	10
3.2	Etapas da Simulação . . . . .	14
4.1	Evolução das contaminações segundo diferentes porcentagens de uso de máscara em sujeitos não vacinados e sem redução da mobilidade . . . . .	17
4.2	Evolução das internações segundo diferentes porcentagens de uso de máscara em sujeitos não vacinados . . . . .	17
4.3	Evolução das mortes segundo diferentes porcentagens de uso de máscara em sujeitos não vacinados . . . . .	18
4.4	Evolução das contaminações com a inserção das vacinas segundo diferentes percentuais em sujeitos sem máscaras . . . . .	19
4.5	Evolução das Internações com a inserção das vacinas segundo diferentes percentuais em sujeitos sem máscaras . . . . .	19
4.6	Evolução das Mortes com a inserção das vacinas segundo diferentes percentuais em sujeitos sem máscaras . . . . .	20
4.7	Evolução Epidemiológica das contaminações com a combinação de vacinas 10% segundo diferentes porcentagens de uso de máscara . . . . .	21
4.8	Evolução Epidemiológica das internações com a combinação de vacinas 10% segundo diferentes porcentagens de uso de máscara . . . . .	21
4.9	Evolução Epidemiológica das mortes com a combinação de vacinas 10% segundo diferentes porcentagens de uso de máscara . . . . .	22
4.10	Evolução Epidemiológica das contaminações com a combinação de vacinas 30% e diferentes porcentagens de uso de máscara . . . . .	22
4.11	Evolução Epidemiológica das internações com a combinação de vacinas 30% e diferentes porcentagens de uso de máscara . . . . .	23
4.12	Evolução Epidemiológica das mortes com a combinação de vacinas 30% e diferentes porcentagens de uso de máscara . . . . .	23
4.13	Evolução Epidemiológica com a combinação de vacinas 50% e diferentes porcentagens de uso de máscara . . . . .	24



# LISTA DE TABELAS

1.1	Eficiência das vacinas contra a COVID-19 utilizadas no Brasil . . . . .	2
3.1	Parâmetros utilizados para simulação da situação Epidemiológica da Cidade de Uberlândia, MG . . . . .	11
3.2	Parâmetros afetados com a utilização de máscara e vacina . . . . .	12
4.1	Evolução dos casos confirmados, internados e mortes e suas as quedas associadas ao uso de máscaras e vacinas . . . . .	25
4.2	Evolução da média diária casos confirmados, internados associadas ao uso de máscaras e vacinas . . . . .	25
4.3	Evolução Epidemiológica das mortes ocorridas nos diversos cenários simulados com vacina e com máscara . . . . .	26

# LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

## LISTA DE ABREVIACÕES

- AC Automatos Celulares
- CDC Centers for Disease Control and Prevention
- COVID-19 Doença por infecção pelo vírus Sars-Cov-2
- HPV Papiloma Vírus Humano
- OMS Organização Mundial da Saúde
- OMS Organização Mundial de Saúde
- OPAS Organização Pan-Americana da Saúde
- SD Desvio Padrão
- SEIR suscetível-exposto-infeccioso-recuperado
- SIR Suscetível, Infectado e Recuperado
- SIRS Suscetível, Infectado, Recuperado, Suscetível
- SUS Sistema nico de Saúde

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 EVOLUÇÃO EPIDEMIOLÓGICA DAS DOENÇAS

Reflexões sobre os modos de vida em sociedade, o crescimento populacional, territorial, frota automobilística e o advento tecnológico têm sido permeadas por desafios advindos da globalização e do avanço tecnológico, fazendo com que cada vez mais as pessoas precisem encontrar novas formas de adaptação para se ter qualidade de vida e viver em sociedade. Apesar de, na atualidade, a expectativa de vida estar em crescimento, a mesma direção não pode ser aplicada à qualidade de vida, que em muitos casos, tem apresentado declínio em decorrência das diversificadas necessidades adaptativas na sociedade, a falta de segurança e principalmente a ocorrência de novas doenças.

Com todos os avanços possíveis da tecnologia, globalização, advento das máquinas, inteligência artificial, o mundo biológico também se insere nessas possibilidades, pois tende a acompanhar a evolução humana. A dinâmica territorial e populacional tem passado a seguir padrões diversificados de exposição ao meio ambiente que, a cada dia, se encontra mais degradado em decorrência dos interesses do capital, fato esse que contribui para novas formas de adoecimento. Se por um lado a tecnologia revolucionou nas formas de diagnóstico e tratamento, como o advento da antibioticoterapia, por outro proporcionou possibilidades para que os microorganismos se desenvolvessem e se tornassem resistentes[24].

No tocante às doenças transmissíveis, é sabido que ela permeia a população desde os nossos antepassados, tendo o potencial de gerar desde pequenos surtos até pandemias. Como a transmissão dessas doenças se dá por meio de contato direto, a realidade no tocante à mobilidade que nos cerca contribui sobremaneira para a propagação de doenças, tendo em vista que os meios de transporte como aviões, navios, carros, motocicletas, ônibus e metrô proporcionam conexões entre cidades e países em um curto intervalo de tempo. Se compararmos com a ocorrência da Gripe Espanhola, que no ano de 1918 contava apenas com o meio de transporte por navios e ferrovias verifica-se que o cenário de mobilidade está com notável diferença. O advento da COVID-19, doença causada pelo vírus SARS-COV-2 e com origem em Wuhan, China, em dezembro de 2019, espalhou-se rapidamente para vários países. No dia 26 de fevereiro de 2020, foi confirmado o primeiro caso importado no Brasil, no estado de São Paulo, vindo da Itália. Passados 56 dias do milésimo registro, o número de casos aumentou mais de 200 vezes, atingindo 233.142 casos no final da 20<sup>a</sup> semana epidemiológica, com o primeiro óbito registrado no dia 17 de março, 20 dias após a confirmação do primeiro caso, também no estado de São

Paulo[7].

O surto começa na China, se torna uma epidemia nesse e se espalha para vários países, sem controle sobre a transmissão por ser uma doença desconhecida. A pandemia pela COVID-19, foi declarada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 11/03/2020 e se configurou num dos maiores desafios para a saúde pública mundial, pois teve uma rápida propagação em diversos países, tendo em vista a evolução da mobilidade populacional. Com uma doença até então desconhecida, bem como desconhecidos os sintomas, principais modos de transmissão, tempo de incubação, o mundo se viu diante de uma condição alarmante e que necessitava de uma ação rápida para conter a disseminação da doença. Uberlândia, situada na região do triângulo mineiro, teve seu primeiro caso confirmado em 17/03/2020 e já possuía 28 suspeitos[17, 19].

O mundo tem enfrentado um grande desafio no gerenciamento da pandemia da COVID-19, pois o comportamento social, que é determinante nessas situações, não é um fator que tem contribuído para controle, redução e erradicação das ocorrências, pois a resistência em manter o distanciamento, utilizar máscaras faciais e até mesmo em se vacinar têm crescido a cada dia. Embora no ano de 2021 tenha se iniciado a aplicação de vacinas eficazes no combate à doença, com protagonismo e participação de órgãos Brasileiros, as taxas de transmissão ainda continuam oscilantes, tendo em vista que alguns países, como por exemplo os da África, não conseguiram ter acesso às vacinas da forma recomendada e de forma equânime, sendo classificada pela OMS de catastrófica a forma de distribuição, pois como a doença ultrapassa todas as fronteiras, caso não haja um esforço global para erradicação, continuará a ameaçar toda a nação com novas variantes, mesmo após o advento da vacinação e com cobertura vacinal significativa [18, 25].

Mesmo com o advento da vacina, a qual teve a sua primeira dose no Brasil aplicada em 17 de janeiro de 2021, as taxas de letalidade permaneceram instáveis. Estudo realizado em Rondônia-RO, entre março e agosto de 2020 mostrou taxa de letalidade de 2,1%. A Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) afirmou que a taxa de letalidade pela COVID-19, em março de 2021, aumentou de 3,3% para 4,2%. Este indicador se encontrava em torno de 2,0% no final de 2020[10, 12].

Com a pandemia, em todo o mundo houve diversas iniciativas com pesquisas clínicas para construção de vacinas. No Brasil, as principais vacinas utilizadas foram: Coronavac, Pfizer, Astrazeneca e Janssen.

Como base para estudo da efetividade das vacinas serão considerados os dados encontrados no artigo de Pescarine et al[20], apresentados na Tabela 1.1:

Tabela 1.1: Eficiência das vacinas contra a COVID-19 utilizadas no Brasil

Vacinas	Descrição	Taxa
Coronavac	Casos sintomáticos com assistência ambulatorial e hospitalar	77,96%
Astrazeneca	População Geral e com comorbidades	73,43%
Pfizer	Após a segunda dose	95%
Jansen	Para casos graves após 28 dias	85,4%

Quanto à Coronavac, os resultados do estudo da fase 3 mostraram que nos casos graves e moderados a eficácia é de 100%. Para os casos leves, 78% e, nos muito leves, 50,38%. Isso

significa que temos 50,38% menos chances de contrair a doença. Se contrairmos, há 78% de chance de não precisarmos de qualquer atendimento médico e 100% de certeza de que a enfermidade não vai se agravar e nem evoluir para óbito. Dentre as principais possibilidades de estratégias de saúde pública para conter a disseminação do Coronavírus, antes e após vacinação, foram utilizadas a redução da mobilidade, com uso de lockdown, redução de contato e uso de máscara facial, inclusive com a criação de leis federais, estaduais e municipais, com o intuito de regulamentar cada região conforme a necessidade e evolução dos casos.

O uso da máscara, embora tenha sido questionado e resistido por parte da população, configurou-se em uma das principais estratégias para contenção da disseminação do vírus. Estudo realizado mostrou que a máscara de procedimento médico, sozinha, bloqueou cerca de 56,1% das partículas de uma tosse simulada ( $SD = 5,8$ ), e a máscara de pano sozinha bloqueou 51,4% ( $SD = 7,1$ ). A combinação da máscara de pano cobrindo a máscara de procedimento médico (máscara dupla) bloqueou 85,4% ( $SD = 2,4$ ), e a máscara de procedimento médico atada e dobrada bloqueou 77,0% ( $SD = 3,1$ ), o que demonstra sua efetividade e a necessidade de discussões que recomendem a continuidade da utilização das mesmas enquanto perdurar o estado de emergência de saúde pública de importância internacional[5].

Com o intuito de estudar a evolução da pandemia, os diferentes cenários que podem se apresentar, bem como a necessidade de vigilância e controle da disseminação viral, pelos órgãos públicos de saúde, percebe-se que as evidências sobre o comportamento do vírus, bem como suas variantes ainda continuam incipientes, o que dificulta previsões sem a utilização de um modelo matemático específico. Com o advento da tecnologia computacional, uma das formas que pode ser utilizada para criar fortes evidências e prever cenários são os estudos de simulação com a utilização de autômato celulares.

Os Autômatos Celulares (AC) foram originados nos sistemas descritos por John von Neumann e Stanislaw Ulamin em 1940 [23]. Os AC são capazes de modelar fenômenos físicos, biológicos ou ambientais complexos de forma simples. Na literatura encontramos os AC usados para simular processos de crescimento, sistemas de difusão de reação, modelos de auto reprodução, modelos epidêmicos, incêndios florestais, algoritmos de processamento de imagem, etc.[27]. Frente a esse cenário desafiador surge-nos o seguinte questionamento: A evolução da transmissão da COVID-19 ou de outras doenças contagiosas pode ser modelada com a simulação por autômato celular?

O controle de uma pandemia perpassa pelas atividades iniciais de prevenção, desenvolvimento da vacina e posteriormente o acompanhamento de sua evolução, despendendo esforços para identificação de novas variantes que possam ameaçar o controle instituído e facilitar o retorno da epidemia/pandemia ou de novos surtos. No Brasil e no mundo alguns fatores são contributivos para um cenário incerto, dentre eles:

1. A instituição de autotestes fez com que as notificações de casos aos órgãos de saúde diminuíssem, interferindo na possibilidade do conhecimento da evolução da verdadeira taxa de transmissão;
2. A evolução da vacinação, juntamente com a desobrigação do uso de máscara facial gerou

o entendimento de que a pandemia foi controlada e que está erradicada, fato inverídico, pois, embora em quantidades menores, a incidência e prevalência da doença, inclusive com ocorrência de óbitos ainda continua a evoluir.

3. O negacionismo de determinada parte da população, que estimulou ao não uso de máscaras faciais, aglomerações em locais de difícil circulação de ar, a criação da cultura antivacina, fez com que as curvas de crescimento se mantivessem em ascendência, dificultando a análise da eficiência de estratégias de políticas públicas.

4. A capacidade mutativa do vírus, o desconhecimento das sequelas que o vírus da COVID-19 é capaz de causar no corpo humano a curto, médio e longo prazo são fatores de alerta para que, mesmo após altas taxas de cobertura vacinal, os órgãos de controle mantenham atenção constante ao desenvolvimento de novas cepas do vírus, bem como os agravos ao corpo humano que são decorrentes da infecção.

Nesse tocante, estudar o comportamento da pandemia por processos simulados em laboratório torna-se um fator essencial para entender o comportamento do vírus em diversos cenários simulados e a partir dessas informações, construir diretrizes que possam contribuir na possibilidade de geração de políticas públicas de saúde, contribuindo com os gestores de saúde e construindo evidências científicas para prever possibilidades de retorno da pandemia e ou estruturação dos serviços de saúde para atendimento de novas demandas.

## 1.2 OBJETIVO

O presente estudo objetiva simular, por meio de autômato celular, a taxa de propagação e letalidade do Sars-cov-2 antes e após o advento da vacinação e do uso de máscara facial.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Neste trabalho realizaremos um estudo com foco na utilização de máscaras em diferentes proporções, bem como o uso de vacinas e o comportamento da disseminação, internações e mortes decorrentes da COVID-19 utilizando a teoria de autômatos celulares. Verificar-se-á o efeito do uso de máscaras por diferentes proporções populacionais, bem como o uso da vacina contra a COVID-19 de forma isolada e em combinação com o uso de máscara facial. A estrutura sequencial do trabalho, a partir do capítulo 1, está dividida na seguinte ordem: O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica para o trabalho, com revisão literária sobre os modelos SIR, Autômatos celulares, Doenças Transmissíveis por vírus e Pandemia da COVID-19.

O capítulo 3 apresenta a Metodologia com base no SIR, a qual foi adaptada para utilização no cenário do presente trabalho. Em sequência, discute-se os parâmetros que foram utilizados para a simulação, bem como os parâmetros que são afetados pelo uso da máscara e da vacina. No capítulo 4 apresenta-se os resultados das simulações e as discussões a respeito. No capítulo 5 apresenta-se as principais conclusões do trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MODELOS SIR

No campo da Epidemiologia, as contribuições dos modelos estatísticos para predição de doenças remontam-se a vários séculos. No ano de 1927 Kermack e McKendrick construíram o modelo sobre o processo de propagação de doenças infecciosas suscetível-infeccioso-recuperado (SIR) para estudar a disseminação da peste negra em Londres, modelo este utilizado até os dias atuais e que serviu de embasamento para se criar os autômatos celulares[13].

A fórmula do modelo SIR (Susceptível-Infetado-Recuperado) é uma equação diferencial que descreve a dinâmica da propagação de doenças infecciosas em uma população. A equação é composta por três termos principais:

$$dS/dt = -\beta \cdot S \cdot I \quad (2.1)$$

$$dI/dt = \beta \cdot S \cdot I - \gamma \cdot I \quad (2.2)$$

$$dR/dt = \gamma \cdot I \quad (2.3)$$

Onde:

S representa o número de indivíduos suscetíveis à doença;

I representa o número de indivíduos infectados;

R representa o número de indivíduos recuperados ou removidos da população;

$\beta$  é a taxa de transmissão da doença, que representa a probabilidade de uma pessoa suscetível se infectar em um encontro com uma pessoa infectada;

$\gamma$  é a taxa de recuperação da doença, que representa a probabilidade de uma pessoa infectada se recuperar em um determinado período de tempo.

As equações descrevem como a proporção de indivíduos em cada categoria (S, I, R) muda ao longo do tempo. A primeira equação mostra a taxa de mudança dos indivíduos suscetíveis, que diminui à medida que eles são infectados. A segunda equação mostra a taxa de mudança dos indivíduos infectados, que aumenta à medida que mais pessoas se tornam infectadas, mas diminui à medida que esses indivíduos se recuperam ou morrem. A terceira equação mostra a taxa de mudança dos indivíduos recuperados, que aumenta à medida que as pessoas se recuperam da doença[13].

O modelo SIR é um dos modelos mais simples para descrever a propagação de doenças infecciosas, e é amplamente utilizado em epidemiologia e em outras áreas de estudo de doenças infecciosas. Posteriormente, com vistas a atualizar o modelo SIR, o período de incubação foi introduzido, tornando o novo modelo como suscetível-exposto-infeccioso-recuperado (SEIR)[4]. Como em casos como as doenças infecciosas as pessoas podem se infectar mais de uma vez, havendo a possibilidade de reinfeção, foi considerado um novo modelo, o suscetível-exposto-infeccioso-recuperado-suscetível (SEIRS)[14].

## 2.2 AUTÔMATOS CELULARES

Autômato celular é um modelo matemático e computacional utilizado para simular sistemas dinâmicos complexos. É um modelo que consiste em uma grade ou rede de células, onde cada célula é um pequeno componente que segue um conjunto de regras simples para interagir com as células vizinhas. O comportamento coletivo dessas células resulta em padrões emergentes que podem representar fenômenos naturais ou sociais[27, 28].

Cada célula em um autômato celular possui um estado e pode ter um número fixo de estados possíveis. A cada passo de tempo, as células são atualizadas simultaneamente de acordo com as regras de transição, que determinam como a célula deve mudar de estado com base em seus estados vizinhos. As regras de transição podem ser determinísticas (ou seja, sempre produzem o mesmo resultado) ou estocásticas (ou seja, produzem um resultado aleatório)[27, 28].

Em um modelo de autômato celular de epidemiologia, cada célula na rede representa um indivíduo e o estado da célula pode ser infectado, suscetível, recuperado ou em quarentena, por exemplo. As regras de transição são baseadas em parâmetros epidemiológicos, como a taxa de transmissão da doença, a taxa de recuperação e a eficácia das medidas de controle[2, 6, 27, 28].

Embora os modelos de autômato celular tenham algumas limitações, como a necessidade de definir parâmetros e regras de transição precisos, eles são uma ferramenta poderosa para ajudar os epidemiologistas a entender e prever a disseminação de doenças infecciosas em populações [2, 6, 27, 28].

A estrutura de vizinhança utilizada para a presente simulação foi a Vizinha de Moore em um passo ( $R=1$ ), conforme Figura 2.1. Dentre as diversas modalidades de vizinhanças que temos na literatura destacamos as seguintes: Von Neumann consiste em que cada célula interage com as outras quatro células adjacentes na vertical e na horizontal para raio de vizinhança igual a um ( $r = 1$ ), nesse caso, os vizinhos que estão na diagonal não possuem interação e pode ser estendida para dimensões maiores denominadas de dois passos como por exemplo com raio igual a dois ( $r = 2$ ). A vizinhança de Moore considera todas as células que estão próximas, seja elas da diagonal, vertical e horizontal, sendo composta por oito células adjacentes para raio de vizinhança igual a um ( $r = 1$ ). A vizinhança de Moore em duas camadas possui raio de vizinhança igual a dois ( $r = 2$ ). Neste trabalho, as células assumirão dois estados possíveis: ocupada ou livre. Quando for ocupada, teremos o espaço da célula preenchido por uma partícula, que representa a ocupação do espaço físico por uma pessoa e essa pessoa assumirá um dos estados descritos na Figura 3.1.



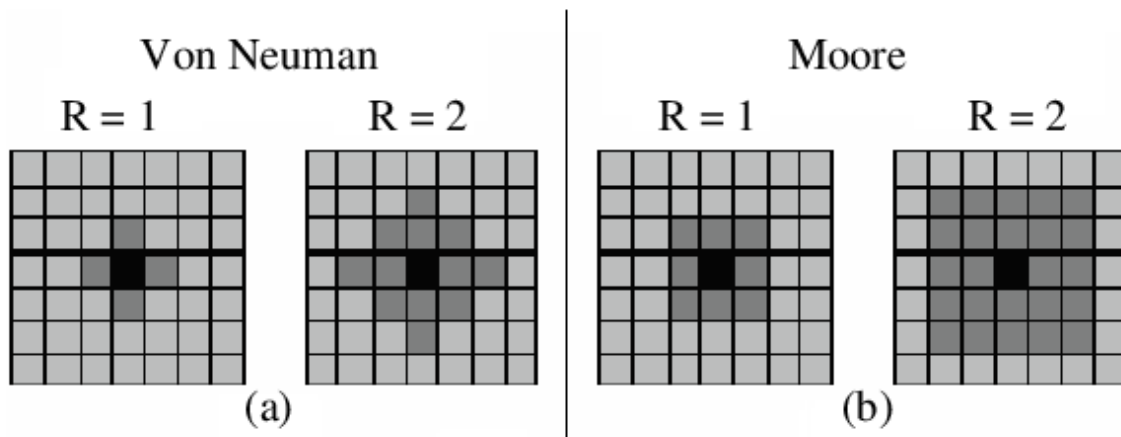


Figura 2.1: Vizinhança de Von Neuman (a) e Moore (b)

## 2.3 DOENÇAS TRANSMISSÍVEIS POR VÍRUS

As doenças transmissíveis são condições que trazem agravamento à população, pois, caso não seja controlado e ou pessoa infectada com a doença seja isolada, não há possibilidade de cessação da cadeia de transmissão, podendo evoluir para contaminações de todo um território e, estado, país ou mundo. Especificamente falando das doenças virais, observa-se que as principais são a gripe, o resfriado, o sarampo, a caxumba, a COVID-19, a síndrome mão-pé-boca, a paralisia infantil, o Papiloma Vírus Humano (HPV), a hepatite e o herpes, por exemplo[6].

Vírus são agentes infecciosos imperceptíveis a olho nu, tem a capacidade de permanecerem por longos períodos em suspensão aérea ou em superfícies, quando entram em contato com o ser humano e alcançam alguma via de entrada, tem o potencial de causar infecção e desenvolver doenças. Entre as doenças de transmissão viral que mais marcaram a história com ocorrências de surtos, epidemias e pandemias, além da COVID-19, estão a Gripe Espanhola, de difícil controle e que causou milhares de óbitos e também a H1N1, que teve uma proporção de propagação menor e que causou um número menor de mortes [6].

O termo Transição Epidemiológica foi consolidado com o advento de eventos relacionados às doenças infecciosas emergentes e reemergentes, que seriam aquelas cuja incidência em humanos vem aumentando nas últimas duas décadas ou ameaça aumentar num futuro próximo. Tais ocorrências surgem em decorrência das modificações do cenário epidemiológico e do comportamento humano, ambiental e social, alterando as estruturas até então conhecidas. A medicina, por meio das indústrias farmacêuticas, avança cotidianamente na produção de drogas cada vez mais potentes para contenção de doenças, contudo, os vírus e bactérias desenvolveram capacidade de adaptação e mutação genética para burlar os efeitos das drogas, o que faz com que uma condição pandêmica como a COVID-19 se torne um fator alarmante, pois com o cenário comportamental na transição epidemiológica, formará-se um ciclo de produção de vacinas e aparecimento de novas cepas, sempre mantendo o risco à saúde da população [15].

As Doenças transmissíveis por vírus continuam a representar um desafio significativo para a saúde pública global. Esses agentes infecciosos possuem tamanhos microscópicos e, por meio de

contatos com secreções respiratórias, gotículas suspensas no ar ou depositadas em superfícies tem o poder de contaminar os seres humanos. Simples contatos como aperto de mão, estar presente em ambientes fechados com pessoas contaminadas, compartilhar utensílios sem a devida proteção são fatores que favorecem a contaminação pelo vírus. Esses vírus têm a capacidade de se espalhar rapidamente entre as populações humanas, resultando em uma variedade de doenças e, em alguns casos, consequências graves para a saúde. Como destacou Baltimore, "Os vírus são parasitas obrigatórios, representando uma das formas de vida mais simples. Não têm estrutura celular e não podem se replicar sem a ajuda de uma célula hospedeira"[2].

Uma das doenças virais transmissíveis que toda a população mundial conheceu desde o ano de 2019 é a COVID-19, causada pelo coronavírus SARS-CoV-2. Desde o seu surgimento no final de 2019, a COVID-19, já a partir de 2020, tem se espalhado por todo o mundo, afetando milhões de pessoas e causando uma crise sanitária de saúde global, denominada de pandemia, com a ocorrência de limitações do sistema cardiorrespiratório, internações com superlotações do Sistema Único de Saúde (SUS), no caso do Brasil e elevados números de óbitos. Uma das principais observações a serem feitas a nível global é que os órgãos de saúde não são preparados a nível de estrutura física e de recursos humanos para enfrentar demandas da dimensão dessa pandemia e, caso não haja comprometimento social e cumprimento das legislações, muitas pessoas podem morrer sem assistência por falta de leitos, a despeito de vários de países que já atingiram taxa de ocupação de 100% dos leitos. As medidas de prevenção, como o distanciamento social, o uso de máscaras e a vacinação, têm sido essenciais para combater a propagação do vírus e reduzir o impacto da doença [18].

Outra doença viral que continua a ser um desafio é a gripe, causada pelos vírus influenza. No ano de 2009 o mundo enfrentou a pandemia pela influenza A, transmitida pelo vírus H1N1, originada no México e que se espalhou por todo o mundo. Há estimativa de que no Brasil houveram 2 mil mortes em decorrência dessa pandemia. Nos anos de 2013 e 2016 o Brasil teve outros dois surtos da H1N1, com epicentro na cidade de São Paulo. A cada ano, ocorrem surtos de gripe sazonal em todo o mundo, resultando em milhões de casos e mortes. A vacinação anual contra a gripe é recomendada como uma das principais estratégias de prevenção. Conforme ressaltado pelo Centers for Disease Control and Prevention (CDC) dos Estados Unidos, "A vacinação contra a gripe é a melhor maneira de proteger a si mesmo e às pessoas ao seu redor da gripe e suas complicações"[8, 19].

Além disso, doenças transmitidas por vetores, como a dengue, a febre amarela e a zika vírus e Chikungunya, continuam a representar um desafio significativo em muitas regiões. Essas doenças são transmitidas por mosquitos infectados e podem causar surtos e epidemias. A prevenção por meio do controle de vetores, como a eliminação de criadouros de mosquitos e o uso de repelentes, continua a ser uma abordagem crucial. A prática de manutenção excessiva de lixo domiciliares, latas, pneus, vasilhas de plantas mal acondicionadas, depósito de lixo em lotes baldios, são locais propícios para propagação de larvas tornam-se criadouros dos mosquitos. O serviço de vigilância epidemiológica, juntamente com os agentes de endemias, tem se desdobrado na tentativa de contenção da disseminação, por meio de orientações diretas, ações

de coleta e tratamento de possíveis criadouros com inseticidas, dentre outras ações. Conforme destacado pela Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS): "O controle integrado de vetores é fundamental para reduzir a transmissão dessas doenças e proteger a saúde da população"[22].

Em resumo, as doenças transmissíveis por vírus representam um desafio contínuo para a saúde pública global. As citações acima ressaltam a importância das medidas de prevenção, vacinação e controle para enfrentar essas doenças e proteger a saúde da população mundial.

## 2.4 PANDEMIA DA COVID-19

A transmissão do SARS-CoV-2 ocorre principalmente por meio de gotículas respiratórias produzidas quando uma pessoa infectada tosse, espirra, fala ou respiração próxima. Essas gotículas podem ser inaladas por pessoas próximas ou depositadas em superfícies, onde o vírus pode permanecer viável por várias horas ou até mesmo dias, dependendo de cada vírus. A infecção ocorre quando uma pessoa saudável entra em contato com o vírus e o mesmo entra nas células do trato respiratório, alcançando as vias aéreas superiores e inferiores [19].

A prevenção da COVID-19 envolve uma combinação de medidas, incluindo o uso de máscaras faciais, a prática de distanciamento físico, a higienização frequente das mãos com água e sabão ou uso de desinfetante à base de álcool, e a adoção de etiqueta respiratória, como cobrir a boca ao tossir ou espirrar. A vacinação também desempenha um papel fundamental na prevenção da doença e na redução da gravidade dos casos. Conforme afirmou Tedros Adhanom Ghebreyesus, diretor-geral da OMS: "Estamos juntos nisso, e só juntos podemos vencer a pandemia"[19].

No campo do tratamento, foram desenvolvidos diversos medicamentos e terapias para enfrentar a COVID-19. Além disso, várias vacinas foram desenvolvidas e aprovadas para uso emergencial em todo o mundo, com o objetivo de proteger as pessoas contra a doença e reduzir a propagação do vírus[18].

É importante ressaltar que a situação da COVID-19 é dinâmica e evolui constantemente, tendo em vista que a falta de vacinas na fase inicial, a falta de adesão às normas de precaução por parte da população, principalmente na resistência à vacina, faz com que haja o desenvolvimento de novas variantes, mostrando com isso a necessidade de atualização das vacinas e também da aplicação de constantes reforços vacinais. Recomenda-se acompanhar as orientações e atualizações de fontes confiáveis, como a OMS e os órgãos de saúde de cada país, para obter informações atualizadas sobre a doença e as medidas de prevenção[19].

A luta contra a COVID-19 continua sendo um desafio global, exigindo esforços coordenados de governos, organizações de saúde, pesquisadores e comunidades para controlar a propagação do vírus, garantir acesso equitativo a vacinas e tratamentos eficazes, e promover a saúde e o bem-estar da população mundial[18].

Em conclusão, a COVID-19 representa um desafio sem precedentes para a saúde pública global. Seus efeitos na saúde, economia e sociedade são significativos. A resposta à pandemia exige esforços conjuntos para conter a propagação, fornecer cuidados de saúde adequados, abordar as consequências socioeconômicas e promover a saúde mental e o bem-estar [19].

### 3. METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de simulação computacional com utilização de modelo adaptado de Dai et al (2021), o qual foi construído conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.1. No fluxograma, parte-se do ponto em que toda a população está suscetível à contaminação, podendo evoluir para infectado (I) ou para assintomático (Ia), o qual não apresenta sintomas e em diversos casos não é testado, evoluindo para a condição de recuperado (R). Quando o indivíduo é infectado, há um tempo de duração da infecção e conseqüentemente um tempo para que seja realizado teste laboratorial e o seu status seja mudado para confirmado (C). Uma vez confirmada, a depender dos sintomas, existe a probabilidade do indivíduo precisar ser hospitalizado (H) ou evoluir diretamente para a recuperação (R). Para o indivíduo na condição de hospitalizado, existe a probabilidade de evoluir para a morte (D) ou para a recuperação, ambos em seus tempos específicos. Este fluxo está apresentado na Figura 3.1

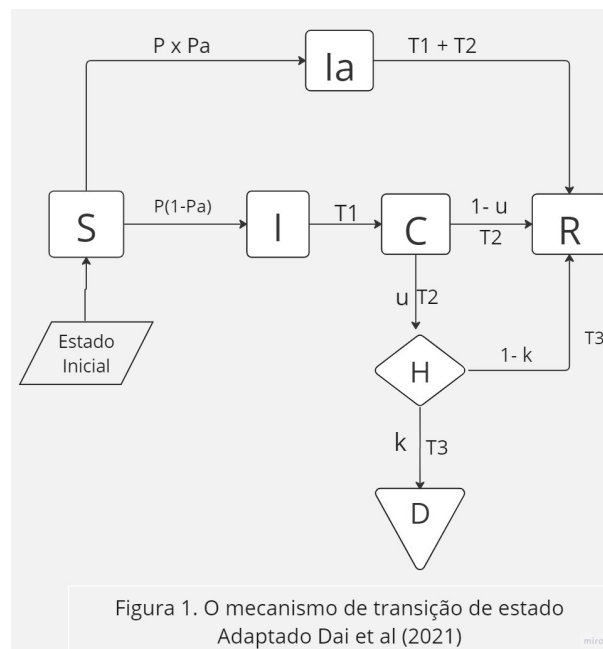


Figura 3.1: Mecanismo de Transição

- I: Infectado;
- S: Suscetível;
- Ia: Infectado assintomático;
- C: confirmado por exame laboratorial;

H: Hospitalizado

R: Recuperado;

D: Morte;

P: probabilidade de infecção;

Pa: probabilidade de infectado assintomático;

T1: Período entre a infecção e a confirmação por exame;

T2: Período entre confirmação e hospitalização ou recuperação espontânea;

T3: Período entre a hospitalização e recuperação ou morte;

k: taxa de mortalidade após internação ;

u: taxa de hospitalização;

Neste trabalho, uma comunidade com um total de  $n^2$  células são consideradas; cada célula pode conter um indivíduo ou estar vazia, e os estados saudáveis do indivíduo são representados por diferentes cores/números, ou seja, 0 para não infectados (S), 1 e 2 para posições vazias (N), 3 para infectados (I), 4 para confirmados (C), 5 para recuperados (R), 6 para hospitalizados (H), 7 para mortos (D) e 8 para assintomáticos (Ia). Assim, o estado do indivíduo  $X(i, j, t) = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$  é usado para representar o estado individual na célula (i, j) no tempo t. T1(i, j, t) é usado para registrar a duração de indivíduos infectados e, da mesma forma, T2(i, j, t) e T3(i, j, t) são utilizados para registrar a duração dos pacientes confirmados e hospitalizados que evoluíram para recuperação ou para a morte[9]. Os parâmetros utilizados para simulação: T1, T2, T3 foram obtidos do estudo de Dai et al[9]

Os dados utilizados para a simulação estão descritos na Tabela 3.1 a seguir:

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados para simulação da situação Epidemiológica da Cidade de Uberlândia, MG

Símbolos	Descrição	valores
n	Base populacional assumida	250000
$\alpha$	Índice de vacância	0,5
$\in$	Número inicial de infectados	10
T1	Período entre a infecção e confirmação	10
T2	Período entre confirmação e hospitalização	4
T3	Período entre hospitalização e recuperação/morte	4
$G_{masc}$	Proporção masculino	0,489
$G_{fem}$	Proporção feminino	0,511
$G_{idade>60}$	Proporção de mais velhos	0,1432
$G_{idade\leq 60}$	Proporção de pessoas mais jovens	0,8568

Os parâmetros que são afetados pelo uso de máscara e de vacina e que foram testados em diferentes proporções estão apresentados na Tabela 3.2 Os parâmetros utilizados para Em, Ev, EvH, EvM,  $u^*$  e  $k^*$  foram adaptados de pesquisas recentes que foram realizadas sobre a dispersão e mortalidade da COVID-19[11, 16, 21]. Já as proporções dos coeficientes de imunidade entre gênero e faixa etária, foram extraídos do estudo de Dai et al. [9]

Tabela 3.2: Parâmetros afetados com a utilização de máscara e vacina

Símbolos	Descrição	valores
Em	Eficiência média das máscaras	0,76
Ev	Eficiência média das vacinas	0,80
EvH	Eficiência média das vacinas para hospitalização	0,86
EvM	Eficiência média das vacinas para prevenir mortes	0,87
u*	Probabilidade de hospitalização	0,15
k*	Probabilidade de morte (Hospitalizado)	0,30
$f_{GeneroM}$	coeficiente de imunidade relacionado ao sexo Masculino	0,81
$f_{GeneroF}$	coeficiente de imunidade relacionado ao sexo feminino	1,00
$f_{Idade>60}$	coeficiente de imunidade em menores de 60 anos	0,83
$f_{Idade\leq 60}$	coeficiente de imunidade em maiores de 60 anos	1,00

É sabido, por meio da literatura científica, que os seres humanos apresentam diferentes níveis de imunidade, estando entre as diversas variáveis confundidoras o sexo e a idade. Pata tanto, para analisar a diferença de imunidade entre essas duas variáveis, o autor Dai el al, apresenta a regra descrita na equação 3.1

$$A(i, j) = f_{Genero} \cdot f_{Idade} \cdot a(i, j) \quad (3.1)$$

Onde  $f_{Genero}$  representa o coeficiente de imunidade relacionado ao sexo, e  $f_{idade}$  representa o coeficiente de imunidade relacionado à faixa etária e assume-se que  $a(i, j)$  segue uma distribuição uniforme entre 0 e 1 [3, 9].

Assume-se que oito vizinhos em um plano bidimensional cercam cada indivíduo, e a regra de interação com os vizinhos é expressa por uma matriz de transição  $N$ [9]:

$$N_{X(i,j)} = \begin{bmatrix} X_{(i-1,j-1)} & X_{(i-1,j)} & X_{(i-1,j+1)} \\ X_{(i,j-1)} & X_{(i,j)} & X_{(i,j+1)} \\ X_{(i+1,j-1)} & X_{(i+1,j)} & X_{(i+1,j+1)} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde  $N$  representa a estrutura vizinha de  $X(i, j)$  em 1 passo (Vizinhança de Moore). Cada elemento dessa matriz representa uma célula vazia ou uma pessoa, que está em contato direto com  $X(i, j)$  e oferece risco.

A probabilidade,  $P^*(i, j, t)$ , de ser infectado por um indivíduo suscetível  $X(i, j)$  no tempo  $t$  é definida da seguinte forma, apresentada na Equação 3.3.

$$P^*(i, j, t) = \frac{1}{8} \times \sum_{\substack{(m,n) \in N_{X(i,j)} \\ m=i \text{ ou } n=j}} P_{X(i,j),X(m,n)}(t) + \frac{1}{8\sqrt{2}} \times \sum_{\substack{(m,n) \in N_{X(i,j)} \\ m \neq i \text{ e } n \neq j}} P_{X(i,j),X(m,n)}(t) \quad (3.3)$$

onde  $P_{X(i,j),X(m,n)}$  representa a probabilidade de  $X(i, j)$  ser infectado por  $X(m, n)$  no tempo  $t$ ,  $Em$  é a eficiência da máscara para morte e  $Ev$  é a eficiência da vacina para contaminação.  $Im_{(i,j)}$  e  $Iv_{(i,j)}$  são variáveis dicotômicas descritas como:

$$Im_{(i,j)} = \begin{cases} 1, & \text{se } X(i, j) \text{ usa máscara;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Iv_{(i,j)} = \begin{cases} 1, & \text{se } X(i, j) \text{ é vacinado;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Para se estudar a probabilidade de um indivíduo se contaminar, utilizaremos a Equação 3.4 a seguir:

$$P(i, j, t) = P^*(i, j, t) \cdot (1 - Em)^{Im(i,j)} \cdot (1 - Ev)^{Iv(i,j)} \quad (3.4)$$

A probabilidade  $P_{X(i,j),X(m,n)}$  pode ser alterada a depender se o indivíduo foi vacinado e/ou se ele é usuário de máscara. Os vizinhos são divididos em duas categorias pela distância: um grupo de vizinhos está a 1 de distância de  $X(i, j)$ , o outro grupo de vizinhos está  $\sqrt{2}$  longe de  $X(i, j)$ . Assim, toma-se o inverso da distância como coeficientes de influência. A probabilidade de ser infectado é inversamente proporcional à resistência, e é proporcional à infectividade de seus vizinhos. Assim, ela pode ser expressa da seguinte forma[9]:

$$P_{X(i,j),X(m,n)}(t) = \sqrt{r_{X(i,j),X(m,n)} \cdot (1 - A(i, j))} \quad (3.5)$$

onde  $r_{X(i,j),X(m,n)}$  representa a infectividade de  $X(m, n)$  para  $X(i, j)$ , que também é assumida como seguindo distribuição uniforme entre 0 e 1. Já o  $A(i,j)$  representa o coeficiente de imunidade relacionado ao Gênero.

Os estados de um indivíduo nas células são atualizados pelo seguinte:

(1) Quando  $X(i, j, t) = 0$ , a possibilidade de ser infectado no tempo  $t$  pode ser calculada conforme descrito na Equação 3.4. Se o indivíduo é infectado,  $X(i, j, t)$  é alterado de 0 para 3,  $T1(i, j, t)$  é alterado de 0 para 1, e o registro da duração de infecção deste indivíduo começa. Se  $X(i, j, t)$  for alterado de 0 para 8, então  $T4(i, j, t)$  será alterado de 0 para 1, iniciando-se o registro da duração da infecção assintomática desse indivíduo;

- (2) Quando  $X(i, j, t) = 1$  ou  $X(i, j, t) = 2$ , o que indica posições vazias seu valor será constante;
- (3) Quando  $X(i, j, t) = 3$  e  $T1(i, j, t)$  excede  $T1$ , o indivíduo será confirmado, e  $X(i, j, t)$  passará a ser 4; então,  $T2(i, j, t)$  mudará de 0 para 1 e começará a registrar o período de confirmação e  $T1(i, j, t)$  retornará a 0;
- (4) Quando  $X(i, j, t) = 8$  e  $T4(i, j, t)$  excede  $T1 + T2$ , o indivíduo se recuperará e  $X(i, j, t)$  se tornará 5.  $T4(i, j, t)$  retornará a 0;
- (5) Quando  $X(i, j, t) = 4$  e  $T2(i, j, t)$  atinge  $T2$ , o indivíduo será internado ( $X(i, j, t) = 6$ ) com probabilidade  $u$  ou se recuperar ( $X(i, j, t) = 5$ ) com a probabilidade de  $1-u$ ,  $u$  é calculado da seguinte forma:  $u = u^*(1 - EvH)^{Iv}$ .

(6) Quando  $X(i, j, t) = 6$  e  $T3(i, j, t)$  atinge  $T3$ , a infecção torna-se fatal ( $X(i, j, t) = 7$ ) com probabilidade  $k$ ; caso contrário, os pacientes se recuperarão após o tratamento ( $X(i, j, t) = 5$ ); A probabilidade  $k$  é calculada da seguinte forma:  $k = k^*(1 - EvH)^{Iv}$ .

A adaptação do código de [9] foi realizada pelo orientador desse trabalho, feito em linguagem C++ através do compilador "Dev C++" e manipulados em um notebook da marca Dell, com processador i7 8a geração com memória RAM de 8GB.

O total de 16 simulações foram realizadas em Desktop Intel(R) Core(TM) i7-9700K CPU @ 3.60GHz 3.60 GHz, com memória RAM de 8GB, levando-se em consideração os diferentes cenários pandêmicos: sem máscara, com máscara, sem vacina, com vacina, sem máscara e com vacina, com máscara e com vacina, com máscara e sem vacina, variando as proporções de usuários de máscara e de cobertura vacinal.

Na simulação, o tamanho do campo foi de 500 x 500 que seria um simulado com 250 mil pessoas. Para esse estudo foi considerado um percentual de ocupação do espaço de 95%, o que equivale a um espaço de 237.500 pessoas. As etapas da simulação estão apresentadas na figura 3.2 . Nesse cenário simulado, considerou-se 100% de mobilidade, ausência do uso de máscaras e vacinas, o que fez com quase toda a população fosse infectada.

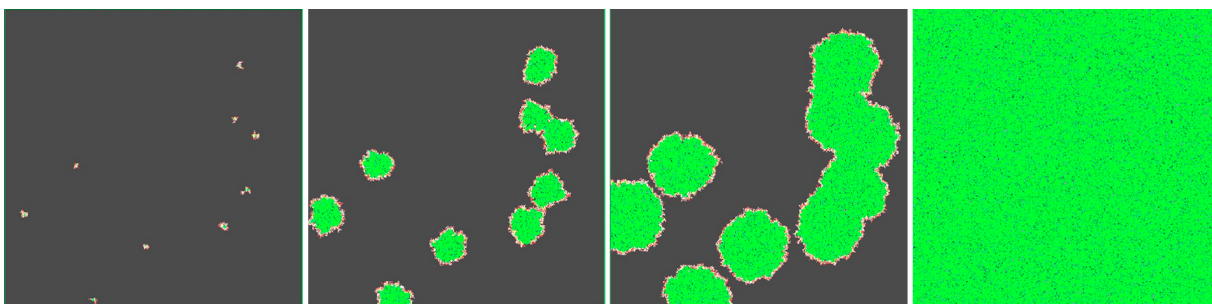


Figura 3.2: Etapas da Simulação

As cores do campo simulado significam o estado de cada célula as quais são consideradas da seguinte forma:

Não infectado - Preto

Infectado sem confirmação - Vermelho

Infectado confirmado - Amarelo



Hospitalizado - Azul

Recuperado - Verde

Morte - Roxo

Assintomático - Branco

A partir desse cenário, foram realizadas simulações levando-se em consideração diferentes percentuais de utilização de máscaras e vacinas, os quais estão apresentados na seção de resultados.

## 4. RESULTADOS

Os resultados da simulação estão apresentados em figuras e tabelas, visando uma melhor dinâmica visual para explanação dos dados.

A discussão ora apresentada, seguirá no intuito de demonstrar que as diferentes modalidades/cenários possíveis em que os agravos à saúde da população poderiam ter sido evitados, se houvesse o conhecimento sobre a simulação, a compreensão e compromisso da sociedade em utilizar máscara de forma adequada, se vacinar, bem como se o poder público tivesse instituído políticas públicas eficazes para o controle da pandemia.

Outro fator a ser refletido, no tocante ao cumprimento de papéis, vale ressaltar a falta de cobrança e punição do poder judiciário em suas variadas nuances para o controle da pandemia e redução de agravos decorrentes.

Iniciaremos a apresentação dos resultados da simulação de contaminações e hospitalizações diárias e também da média móvel quinzenal de mortes relacionadas, utilizando as simulações e diferenciações em cenários com o uso de máscara, em proporções de 0%, 10%, 30%, 50% Figura 4.1 a Figura 4.3; também será apresentada a simulação para o uso de vacina, com as proporções de 0%, 10%, 30%, 50%, 80% Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6.

A Figura 4.1 demonstra o pior cenário possível para a evolução da pandemia, tendo em vista que trata-se de pessoas sem o uso de máscara, sem redução da mobilidade e também sem a vacina. Nesse pior cenário, observou-se a ocorrência de 117.618 contaminações, conforme Tabela 4.1.

Ao diversificar a proporção de usuários de máscara facial, observa-se que, à medida que cresce o número de usuários de máscaras, o número de contaminações regride proporcionalmente, alcançando melhores cenários a partir do uso de 30%, melhorando consideravelmente quando a utilização é de 50%, o que reduz as ocorrências para 71.080 e que equivale a aproximadamente 40% das ocorrências. Para o estudo do cenário de internações em decorrência da COVID-19, os dados estão apresentados na Figura 4.2

É sabido que um dos fatores mais preocupantes na gestão da pandemia foi o sufocamento do Sistema Único de Saúde nas condições de pico, pois a cidade de Uberlândia-MG, embora possua uma ampla rede de leitos na atenção secundária e terciária, atua como referência em alta complexidade para municípios circunvizinhos, o que aumenta o fluxo de pessoas e reduz a

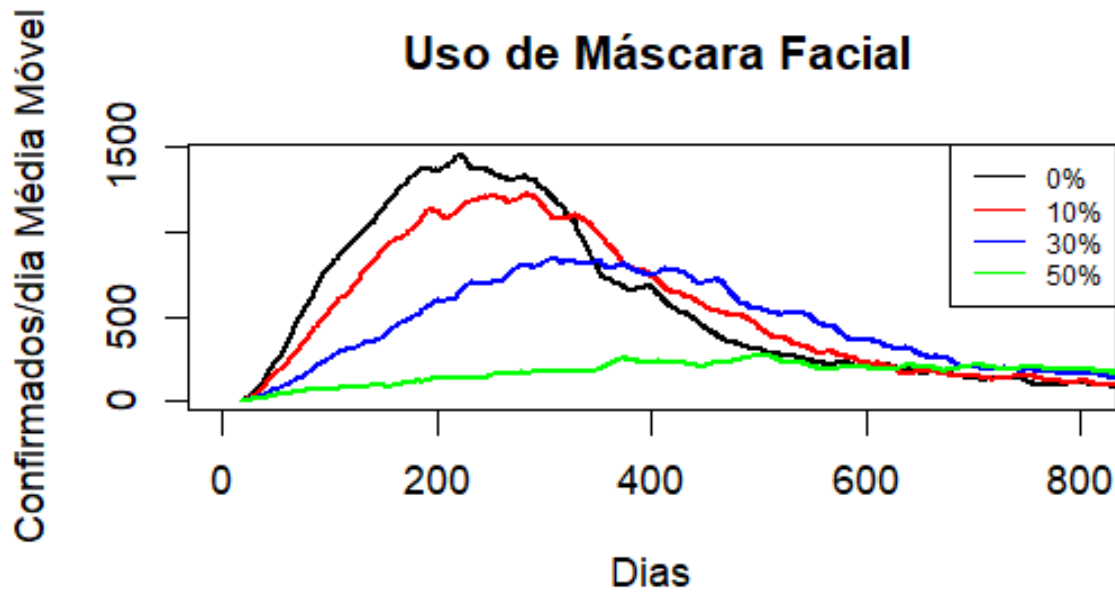


Figura 4.1: Evolução das contaminações segundo diferentes percentagens de uso de máscara em sujeitos não vacinados e sem redução da mobilidade

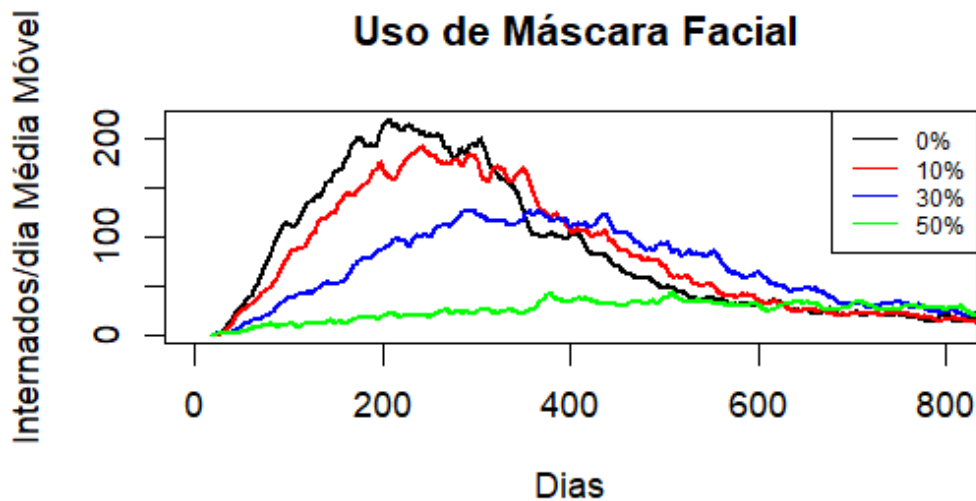


Figura 4.2: Evolução das internações segundo diferentes percentagens de uso de máscara em sujeitos não vacinados

proporção de leitos por doentes. Tendo em vista que a COVID-19 trata-se de uma doença que atinge predominantemente o sistema respiratório, todos os casos graves precisam de assistência em Unidades de Terapia Intensiva (UTI) com uso de ventilação mecânica. Como o número de leitos de UTI, a nível nacional é reduzido, o aumento de casos graves poderia elevar as chances de que em determinado momento faltasse leitos para internações e as vítimas graves não tivessem o suporte adequado, podendo evoluir à óbito.

Vale ressaltar que, as internações superlotam não só as UTI, mas também as unidades de

internação, pronto socorro, medicina diagnóstica, laboratorial, higienização, dietética, dentre outras. Por se tratar de doença transmissível, as unidades precisam ser específicas e isoladas de outras pessoas internadas por condições diferentes, o que dificulta a estruturação da área física, recursos humanos e principalmente os recursos materiais específicos, os quais se mostraram escassos a nível nacional devido ao elevado uso e, por falta de mão de obra, as empresas produtoras não conseguiram produzir em quantidade necessária para a alta demanda. A simulação mostrou uma média diária máxima em torno de 200 internações por dia, fato que poderia ter sido reduzido para menos da metade, caso houvesse a utilização de máscara por 50% da população. Vale ressaltar que, para além das superlotações dos leitos hospitalares, os custos com as internações foram demasiadamente elevados, o que faz com que o SUS precise deslocar verbas para determinadas áreas de promoção da saúde para tratar a emergência.

As mortes em decorrência da COVID-19 assolou o país e o mundo com sua elevada ocorrência, ceifando vidas jovens e desestruturando a economia do país.

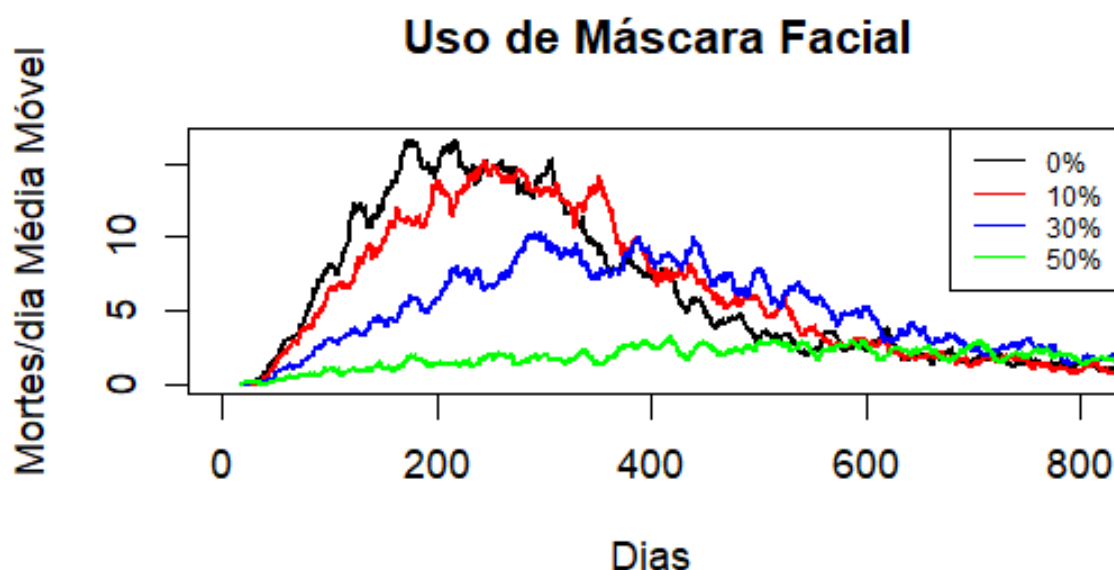


Figura 4.3: Evolução das mortes segundo diferentes porcentagens de uso de máscara em sujeitos não vacinados

Observa-se na figura 4.3 que o pior cenário, sem máscara e sem vacina, provocou média móvel quinzenal de  $5,92 \pm 5,25$  mortes, com média máxima de aproximadamente 16 mortes por dia. Na simulação, o simples fato de utilizar máscara foi capaz de provocar as reduções em mortes: 10%: 17 mortes; 30%: 648 mortes; 50% 2.079 mortes<sup>4.2</sup>.

Após longo período de espera por uma vacina que fosse eficaz para contenção da transmissão viral e de testes diagnósticos que fossem acessíveis e com resultado rápido em todo o mundo, obteve-se se a aprovação da vacina contra a COVID para utilização no Brasil. Como a oferta inicial foi baixa e a demanda extremamente alta, pois todo o mundo estava à espera e houve-se a

necessidade de estipular grupos de risco para receberem as primeiras vacinas, sendo organizadas por etapas.

Nesse intuito, com a finalidade de verificar a evolução do cenário epidemiológico com a inserção da vacina, realizou-se cenário simulado para identificar o comportamento da pandemia na prevalência e incidência de casos, internações e mortes, considerando-se as diferentes taxas de cobertura vacinal sem a utilização de máscara e/ou redução da mobilidade.

Inicialmente testou-se o comportamento epidemiológico quando a cobertura vacinal variou de 10% a 80%, conforme apresentado nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6.

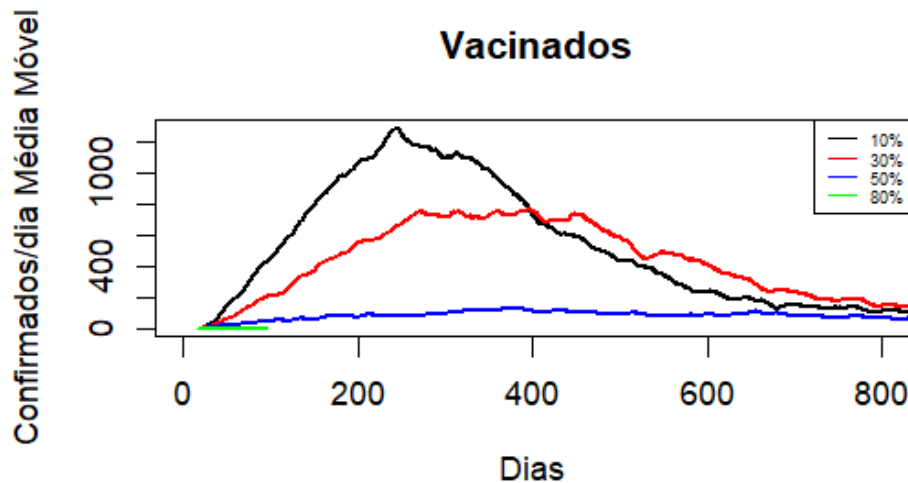


Figura 4.4: Evolução das contaminações com a inserção das vacinas segundo diferentes percentuais em sujeitos sem máscaras

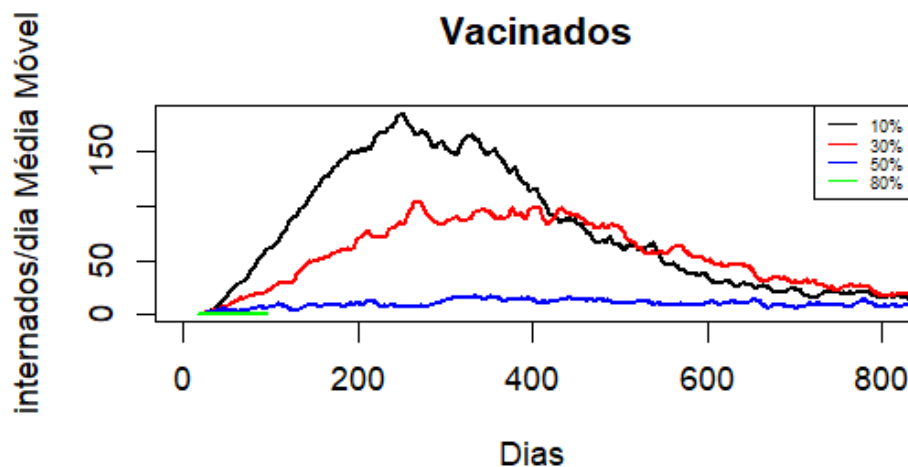


Figura 4.5: Evolução das Internações com a inserção das vacinas segundo diferentes percentuais em sujeitos sem máscaras

A eficiência da vacina para controle do cenário pandêmico é indiscutível, pois trata-se da melhor ferramenta para conter a disseminação viral para todas as doenças transmissíveis exis-

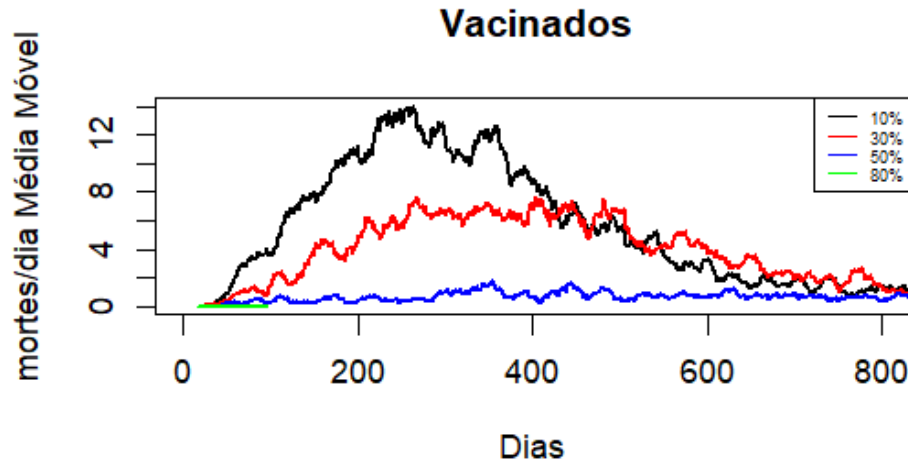


Figura 4.6: Evolução das Mortes com a inserção das vacinas segundo diferentes percentuais em sujeitos sem máscaras

tentes. Observa-se que, no cenário simulado, sem a vacina, houve uma média de  $130,69 \pm 118,33$  contaminações, com média de  $19,53 \pm 17,96$  internações diárias e média móvel quinzenal de 5,92 mortes em decorrência da COVID-19. Ao atingir 50% de cobertura vacinal, observou-se um decréscimo para  $10,12 \pm 8,99$ ,  $1,10 \pm 1,40$  e  $0,32$ , respectivamente. Tal cenário, ainda que contrariando o pensamento anticiência, mostra que a vacina ainda continua sendo a melhor estratégia de escolha, devendo os órgãos públicos dispender esforços para a reconstrução da ciência e investimentos em pesquisa. No intento de pensar em diferentes cenários, optou-se por simular as combinações entre os percentuais de vacinados e o uso de máscaras, com o objetivo de identificar qual o melhor cenário poderia ser simulado, caso houvesse novamente uma outra pandemia de igual magnitude, ou até mesmo para estimar o comportamento epidemiológico nessas situações, as quais estão apresentadas na Figura 4.7 com cobertura vacinal de 10%, na Figura 4.8 com cobertura vacinal de 30% e na Figura 4.9 com cobertura vacinal de 50%:

Observa-se que, mesmo a combinação com 10% de vacinados e 10% de usuários de máscaras, houve uma redução percentual quando comparados apenas ao uso de vacinas com as mudanças: confirmados  $130,69 \pm 118,33$ , internações  $19,53 \pm 17,96$ , mortes 5,92, reduzindo para  $98,91 \pm 86,30$ ,  $14,18 \pm 12,77$ , 4,28, respectivamente. quando a proporção de usuários de máscaras aumentou para 50%, obteve-se resultados similares à cobertura vacinal de 80%, com os seguintes dados:  $2,72 \pm 2,06$ ;  $0,40 \pm 0,67$ ; 0,10, respectivamente. Tal cenário mostra que a utilização da máscara facial associada à vacinação, ainda que com apenas 10% de cobertura vacinal, alcançou excelentes resultados quando a utilização de máscaras foi de 50%, se configurando em um dos melhores cenários, pois contribuiu para a estratégia de redução da disseminação viral e suas consequências na internação e mortes.

Observa-se, na Figura 4.10 que em vários cenários, a associação do uso de máscaras e de

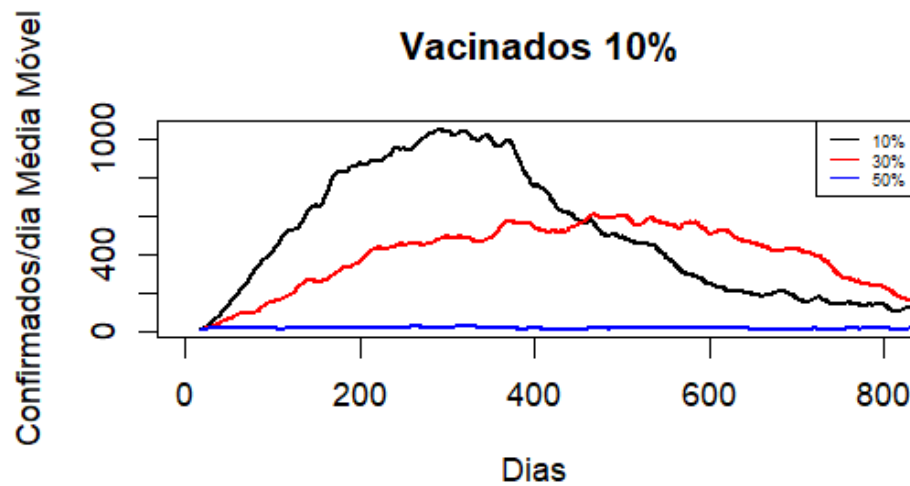


Figura 4.7: Evolução Epidemiológica das contaminações com a combinação de vacinas 10% segundo diferentes porcentagens de uso de máscara

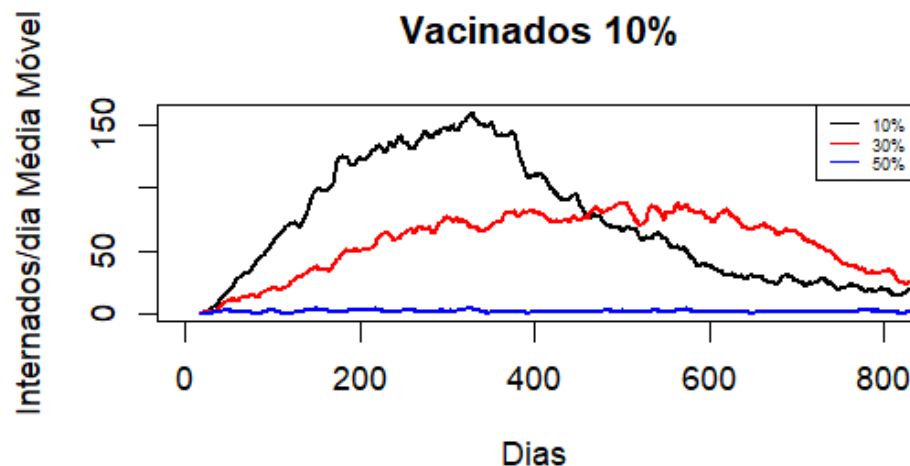


Figura 4.8: Evolução Epidemiológica das internações com a combinação de vacinas 10% segundo diferentes porcentagens de uso de máscara

vacinas foi mais eficaz no controle epidêmico quando utilizada apenas uma alternativa isolada, ainda que em maior proporção. Para o caso de 50% de cobertura vacinal associado a 10% de uso de máscaras, produziu efeito similar à associação de 10% de cobertura vacinal combinado com 50% de máscaras, figura 4.7. Logo, se tivéssemos a conscientização popular, políticas públicas de incentivo e cobrança de cumprimento das regras sanitárias, considerando o cenário apresentado, teríamos tido uma queda de 114.442 mil contaminações, 17,110 mil internações e 5.131 mortes, conforme Tabela 4.1.

O uso obrigatório de máscaras foi recebido com certo grau de resistência por parte da população, tendo em vista a corrente negacionista que se instalou no Brasil durante a pandemia. Fatores como a falta de produtos e elevação dos preços em decorrência da escassez no mercado fez com que a estratégia de máscaras de tecidos fossem adotadas. Os estudos realizados sobre a

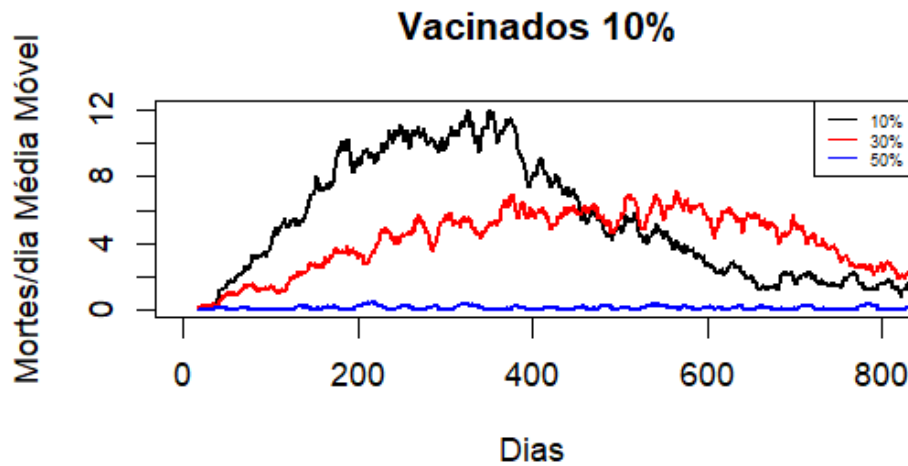


Figura 4.9: Evolução Epidemiológica das mortes com a combinação de vacinas 10% segundo diferentes porcentagens de uso de máscara

efetividade de tal máscara, destacam a importância de utilização como fator de proteção para sintomáticos domiciliares, cuidadores e pessoas que moram em habitações com muitos moradores, tendo em vista que podem ser reutilizáveis, de fácil higienização e de baixo custo. Ações como deslocamento, permanência em espaços com aglomerações e utilização de transportes públicos são momentos recomendados para a utilização da máscara de tecido[26] .

As Figuras 4.10, 4.11, 4.12 demonstram a evolução epidemiológica dos casos quando se alcançou cobertura vacinal de 30% segundo diferentes proporções de usuários de máscaras.

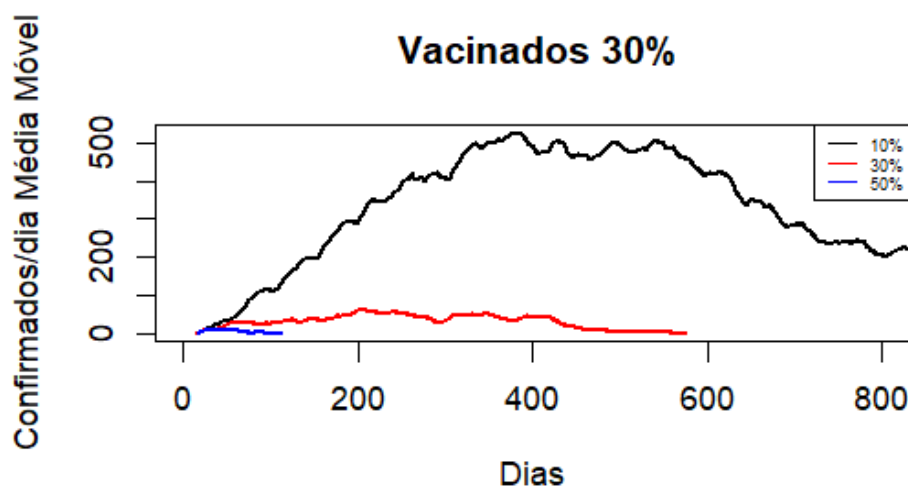


Figura 4.10: Evolução Epidemiológica das contaminações com a combinação de vacinas 30% e diferentes porcentagens de uso de máscara

Com a cobertura vacinal de 30%, uma associação de também 30% de usuários de máscaras já seriam suficientes para controlar o cenário epidemiológico e a população voltar às atividades normais, conforme pode ser observado na figura 4.10, tanto as contaminações, como as



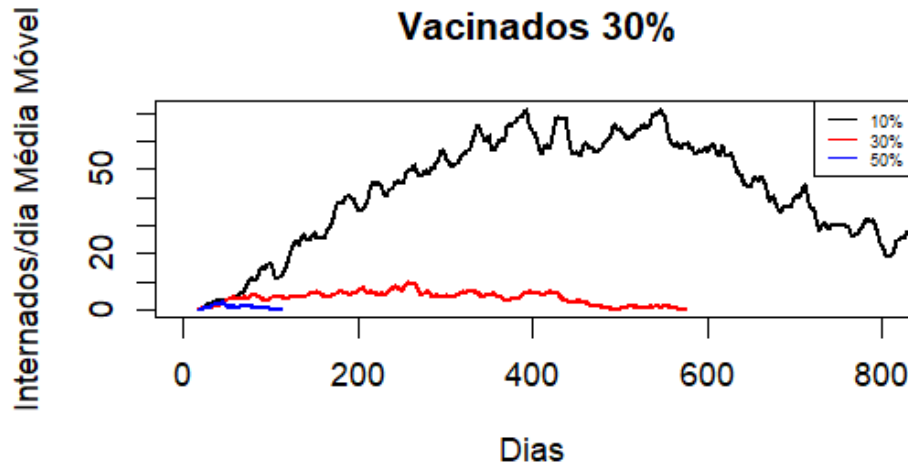


Figura 4.11: Evolução Epidemiológica das internações com a combinação de vacinas 30% e diferentes porcentagens de uso de máscara

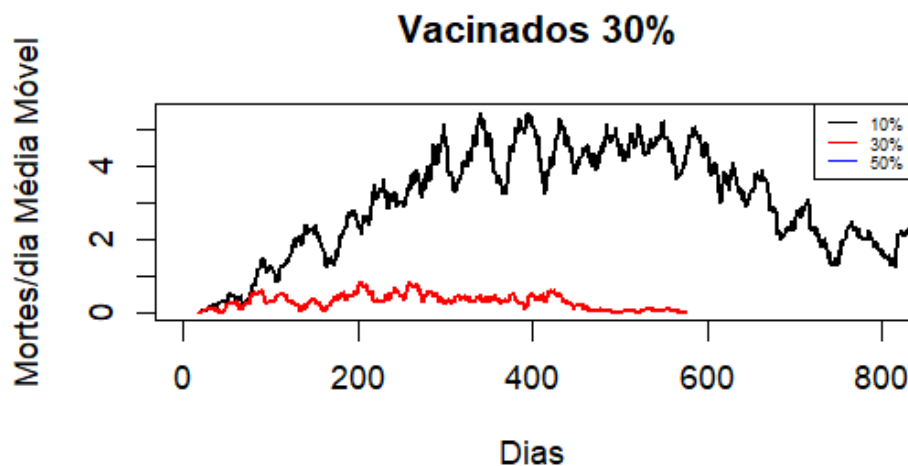


Figura 4.12: Evolução Epidemiológica das mortes com a combinação de vacinas 30% e diferentes porcentagens de uso de máscara

internações e mortes se mantiveram em patamares baixos, demonstrando a eficácia do cenário simulado, conforme Tabela 4.1.

O cenário construído para a cobertura vacinal de 80% e as associações com o uso de máscaras estão apresentados na Figura 4.13.

A evolução epidemiológica com diferentes percentuais de vacinados  $V(\%)$  e de usuários de máscaras  $M(\%)$ , bem como as quedas estimadas de cada cenário simulado estão apresentadas na Tabela 4.1

Ao atingir 80% de cobertura vacinal, observa-se que o cenário epidemiológico se manteve em controle, com pequenas oscilações. O uso associado de máscaras não só melhorou ainda mais o

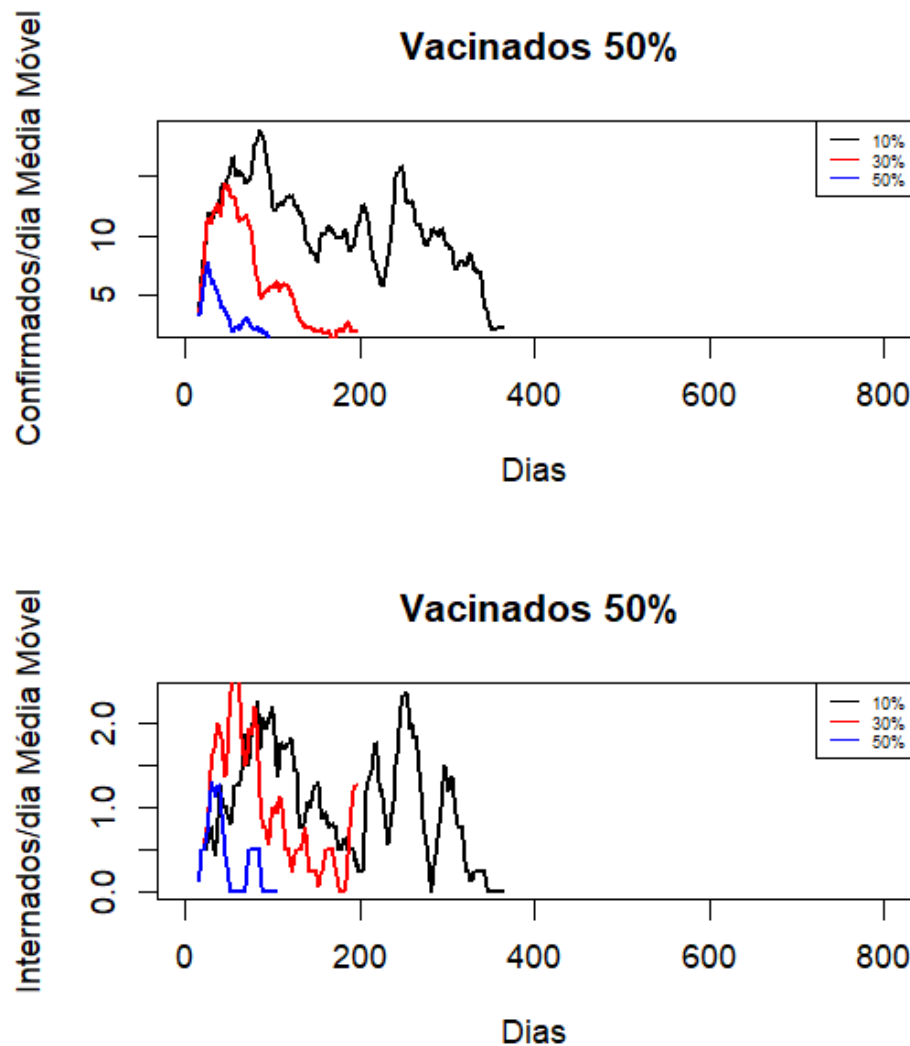


Figura 4.13: Evolução Epidemiológica com a combinação de vacinas 50% e diferentes porcentagens de uso de máscara

cenário para contaminações e internações, mas fez com que não houvesse nenhuma morte em decorrência da COVID-19.

A Tabela 4.2 denota as principais médias de casos confirmados e ocorrência de internações para os diferentes cenários simulados. Uma das principais preocupações da sociedade mundial, antes mesmo do cuidado com a vida, tratou-se da economia, pois com a redução da circulação e instauração do lockdown, houve aumento significativo nos postos de trabalho, meios de consumo, remunerações, dentre outras consequências [1]. É salutar entender que caso houvesse uma credibilidade maior na ciência, os cenários poderiam ter sido diferentes e a economia não precisaria ter se desestruturado, conforme demonstra as médias na Tabela 4.2.

Apenas o uso da máscara, foi capaz de produzir as significantes reduções nas médias contaminações de  $130,69 \pm 118,33$  quando a proporção de usuários de máscaras era 0%, para  $21,99 \pm 16,55$ , quando a proporção de usuários de máscaras era 50%, ocasionando uma redução de 46,538 casos. Nessas mesmas proporções, o número de mortes evitáveis seriam 2.079 con-

Tabela 4.1: Evolução dos casos confirmados, internados e mortes e suas as quedas associadas ao uso de máscaras e vacinas

Cenário		Confirmados		Internados		Mortes	
M (%)	V(%)	TC	Queda	TI	Queda	TM	Queda
0	0	117,618	-	17,575	-	5,250	-
10	0	113,491	4,127	17,149	426	5,233	17
30	0	101,995	15,623	15,405	2,170	4,602	648
50	0	71,080	46,538	10,570	7,005	3,171	2,079
0	10	112,821	4,797	16,104	1,471	4,764	486
0	30	98,819	18,799	12,409	5,166	3,612	1,638
0	50	44,587	73,031	4,865	12,710	1,382	3,868
0	80	77	117,541	33	17,542	0	5,250
10	10	107,816	9,802	15,456	2,119	4,608	642
30	10	93,403	24,215	13,371	4,204	4,608	642
50	10	3,176	114,442	465	17,110	119,0	5.131
10	30	90,637	26,981	11,549	6,026	3,310	4,919
30	30	4,589	113,029	593	16,982	173,0	5.077
50	30	175	117,443	23	17,552	10,0	5,240
10	50	937	116,681	90	17,485	19,0	5,231
30	50	289	117,329	47	17,528	8,0	5,242
50	50	76	117,542	9	17,566	3,0	5,247

\* TC: Total de confirmados; TI: Total de Internados; TM: Total de mortes

Tabela 4.2: Evolução da média diária casos confirmados, internados associadas ao uso de máscaras e vacinas

Cenário		Confirmados		Internados	
M(%)	V(%)	Média	±DP	Média	±DP
0	0	130,69	118,33	19,53	17,96
10	0	113,26	101,36	17,11	15,78
30	0	80,63	67,73	12,18	10,60
50	0	21,99	16,55	3,27	2,93
0	10	116,07	99,62	16,57	14,81
0	30	74,98	64,93	9,42	8,58
0	50	10,12	8,99	1,10	1,40
0	80	0,80	1,43	0,03	0,17
10	10	98,91	86,30	14,18	12,77
30	10	63,76	51,46	9,13	7,88
50	10	2,72	2,06	0,40	0,67
10	30	47,43	41,14	6,04	5,75
30	30	7,97	5,37	1,03	1,15
50	30	1,56	1,81	0,21	0,54
10	50	2,58	1,88	0,25	0,54
30	50	1,48	1,76	0,24	0,53
50	50	0,73	1,28	0,09	0,32

\* M: Máscaras; V: Vacinas; DP: Desvio Padrão

forme Tabela 4.1 e Tabela 4.2.

Cenários que poderiam contribuir de melhor forma com os serviços de saúde pública, no

Tabela 4.3: Evolução Epidemiológica das mortes ocorridas nos diversos cenários simulados com vacina e com máscara

Cenário		Mortes	
M(%)	V(%)	Média*	TotalAC
0	0	5,92	5,250
10	0	5,29	5,233
30	0	3,67	4,602
50	0	0,98	3,171
0	10	4,97	4,764
0	30	2,76	3,612
0	50	0,32	1,382
0	80	0,0	0,0
10	10	4,28	4,608
30	10	4,14	4,608
50	10	0,10	119,0
10	30	1,74	3,310
30	30	0,31	173,0
50	30	0,10	10,0
10	50	0,05	19,0
30	50	0,04	8,0
50	50	0,03	3,0

\* média móvel quinzenal; M: Máscaras; V: Vacinas; AC: Acumulado

intuito de auxiliar no controle das estratégias de contenção da disseminação viral, em condições simuladas, seriam:

1: no cenário em que não haviam vacinas, a melhor estratégia foi de 50% de utilização de máscaras, pois produziu uma média de  $21,99 \pm 16,55$  para casos confirmados e  $3,27 \pm 2,93$  para ocorrência de internações;

2: No cenário em que as vacinas foram associadas a melhor estratégia foi a combinação de 50% de cobertura vacinal e 50% de usuários de máscaras, pois produziu o melhor cenário de todas as simulações, com média de  $0,73 \pm 1,28$  de casos confirmados e  $0,09 \pm 0,32$  casos de internações por dia.

3: Na ausência da utilização da máscara, o melhor cenário foi de 80% de cobertura vacinal, o que produziu média de  $0,80 \pm 1,43$  de casos confirmados e  $0,03 \pm 0,17$  casos de internações, conforme a Tabela 4.2

Entre essas mortes estão inclusas diversas categorias de pessoas, jovens, trabalhadores, pais, mães, filhos, que teriam suas mortes evitáveis caso houvesse um comprometimento social e político com valorização da ciência e de avanços modernos como a utilização de AC como ferramenta para auxiliar na gestão de crises epidêmicas.

Observa-se na Tabela 4.3 que o cenário sem vacina e sem máscaras produziu um acumulado de 5.250 mortes, já no cenário com 50% de cobertura vacinal e 50% de usuários de máscaras o acumulado seria de três mortes.

No computo geral, observa-se que a simulação conseguiu produzir cenários próximos aos avanços estabelecidos na literatura científica, demonstrando que o uso de AC é uma ferramenta

que deve ser utilizada pelos Epidemiologistas e Estatísticos com o intuito de auxiliar as instituições de saúde e governo a preverem e gerenciarem da melhor forma as Epidemias de Doenças transmissíveis por vírus em seus diferentes aspectos.

Destaca-se como limitação do presente estudo a não comparação com o cenário atual, tendo em vista que não só a cidade de Uberlândia, mas todo o Brasil possui um Sistema de Informação frágil, que não se comunica entre si e que gera diversos casos de subnotificação. No caso da COVID-19, ainda que estivesse compondo a lista de doenças de notificação compulsória, não se conseguiu organizar um sistema de informação para registros em tempo real, o que inviabilizou as comparações por falta de registros confiáveis.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou identificar a eficácia do uso de simulação, por meio de Automato Celular, para prever diferentes cenários para Doenças Infectocontagiosas transmitidas por vírus. O modelo adaptado apresentou valores próximos à realidade para uma cidade de grande porte como a de Uberlândia, reafirmando o que a ciência tem divulgado e dando-nos indícios de que a vacinação e o uso concomitante de máscaras faciais são medidas eficazes para se enfrentar condições pandêmicas graves, como foi o caso da pandemia pela COVID-19.

Durante a pandemia, vários modelos epidemiológicos complexos foram desenvolvidos e testados, mas tais modelos tornam-se inviáveis para utilização em condições amplas, a exemplo do uso de AC, que se configura em modelagem simples e que consegue prever cenários similares aos modelos complexos, fazendo com que o arsenal da estatística esteja cada vez mais atualizado.

Do ponto de vista epidemiológico, a realização da presente simulação mostra que a Estatística continua sendo uma área fundamental para o estudo e controle de doenças transmissíveis.

Como resultado principal da presente simulação, destaca-se que a utilização de máscara facial pela população melhorou todos os cenários testados e, por si só, na ausência de vacinas, demonstrou poder de redução parcial das contaminações, ainda que com 100% de mobilidade populacional, o que nos leva a refletir sobre os estímulos, leis e até mesmo a obrigatoriedade do uso de máscaras em situações dessa magnitude, visando a proteção da saúde, redução de internações e custos para os sistemas de saúde e conseqüentemente a redução de mortes.

Como perspectivas futuras, sugere-se a realização de estudos testando diferentes cenários a partir dos agravos causados pela COVID-19, pois tal cenário poderá prever a ocorrência de doenças e apoiar o poder público na construção de políticas públicas voltadas para a população específica.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALVARENGA, D.; GERBELLI, L. D. M. R.: *Como a pandemia 'bagunçou' a economia brasileira em 2020*, 2020. <https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/12/12/como-a-pandemia-baguncou-a-economia-brasileira-em-2020.ghtml>, acessado em 11/07/2022.
- [2] BALTIMORE, D.: *Nobel Lecture: Viruses, Polymerases, and Cancer*. *Physiology or Medicine*, 1(1):215–226, 1975. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1975/baltimore/lecture/>.
- [3] BIN, S.; SUN, G. C. C.: *Spread of infectious disease modeling and analysis of different factors on spread of infectious disease based on cellular automata*. *Int. J. Public Health*, 16(4683), 2019. <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/23/4683>.
- [4] BISWAS, H. A.; PAIVA, L. D. P. M.: *A SEIR model for control of infectious diseases with constraints*. *Math. Biosci. Eng.*, 11(1):761–784, 2014. <http://www.aimspress.com/article/10.3934/mbe.2014.11.761>.
- [5] BROOKS, J. T. *et al.*: *Maximizing Fit for Cloth and Medical Procedure Masks to Improve Performance and Reduce SARS-CoV-2 Transmission and Exposure, 2021*. *MMWR*, 70(7):254–257, 2021. <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/70/wr/mm7007e1.htm>.
- [6] CASTRO, M. L. A.; CASTRO, R. O.: *Automatos celulares: implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram*. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, 3(3):89–106, 2008. [https://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo\\_thumb/Aut-matos-Celulares-Implementa--es-de-Von-Neumann--Conway-e-Wolfram.pdf](https://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/Aut-matos-Celulares-Implementa--es-de-Von-Neumann--Conway-e-Wolfram.pdf).
- [7] CAVALCANTE, J. R. *et al.*: *COVID-19 no Brasil: evolução da epidemia até a semana epidemiológica 20 de 2020*. *Epidemiologia e Serviços de Saúde* [online], 39(29):e–2020376, 2020. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742020000400010>.
- [8] CONTROL, C. F. e PREVENTION(CDC): *Key Facts About Seasonal Flu Vaccine, 2022*. <https://www.cdc.gov/flu/prevent/keyfacts.htm>, acessado em 07/07/2023.
- [9] DAI, J. *et al.*: *Modeling the Spread of Epidemics Based on Cellular Automata*. *Processes*, 9(55):SP, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9010055>.

- [10] ESCOBAR, A. L. *et al.*: *Letalidade e características dos óbitos por COVID-19 em Rondônia: estudo observacional*. Epidemiologia e Serviços de Saúde [online], 30(1):e-2020763, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1679-49742021000100019>.
- [11] ESTADO, R. G. d. S.: *Estudo aponta redução de 87no risco de óbitos por covid-19 em pessoas com vacinação completa*, 2021. <https://saude.rs.gov.br/estudo-aponta-reducao-de-87-no-risco-de-obitos-por-covid-19-em-pessoas-com-vacinacao-completa>, acessado em 12/07/2023.
- [12] FIOCRUZ: *Fiocruz diz que taxa de letalidade da Covid no Brasil aumentou para 4,2% em março*, 2021a. <https://g1.globo.com/bemestar/coronavirus/noticia/2021/04/06/fiocruz-diz-que-taxa-de-letalidade-por-covid-19-no-brasil-aumentou-em-marco-para-42percent.html>, acessado em 06/11/2022.
- [13] KERMACK, W. O. e G., M. A.: *A contribution to the mathematical theory of epidemics*. Royal Society, 115(772):700–721, 1927. <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspa.1927.0118>.
- [14] LIU, J.; ZHANG, T.: *Epidemic spreading of an SEIRS model in scale-free networks*. networks. Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 16(1):3375–3384, 2011. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1007570410006088?via%3Dihub>.
- [15] LUNA, E. e SILVA JR., J.: *Doenças transmissíveis, endemias, epidemias e pandemias*. In FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. *A saúde no Brasil em 2030 - prospecção estratégica do sistema de saúde brasileiro: população e perfil sanitário* [online], vol. 2. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>, 1ª ed., 2013. Rio de Janeiro: Fiocruz/Ipea/Ministério da Saúde/Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República.
- [16] MORAIS, F. G. *et al.*: *Filtration efficiency of a large set of COVID-19 face masks commonly used in Brazil*, 2021, Aerosol Science and Technology. <https://portal.if.usp.br/imprensa/pt-br/node/3291>, acessado em 12/07/2023.
- [17] (Município), U.: *Prefeitura de Uberlândia confirma primeiro caso de coronavírus na cidade.*, 2020. <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2020/03/17/prefeitura-de-uberlandia-confirma-primeiro-caso-de-coronavirus-na-cidade.ghtml>, acessado em 08/01/2022.
- [18] (OMS), O. M. D. S.: *Chefe da OMS alerta contra "fracasso moral" da vacinação contra Covid-19*, 2021. <https://news.un.org/pt/story/2021/01/1739022>, acessado em 18/01/2022.
- [19] (OMS), O. M. D. S.: *WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19.*, 2022. <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who->



- [director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---3-february-2022](#), acessado em 07/07/2023.
- [20] PESCARINI, J. M. *et al.*: *Métodos para avaliação da efetividade de vacinas para COVID-19 com ênfase em abordagens quase-experimentais*. *Ciência Saúde Coletiva*, 26(11):5599–5614, 2021. <https://www.scielo.br/j/csc/a/RjvCPyxNCqhmTNJpWNNdMbs/>.
- [21] SATIE, A.: *Saiba qual é a eficácia das principais vacinas contra a Covid-19*, 2020. <https://www.cnnbrasil.com.br/saude/qual-a-eficacia-das-principais-vacinas-contra-a-covid-19/>, acessado em 12/07/2023.
- [22] Saúde (OPAS), O. P. A. da: *Doenças transmitidas por vetores*, 2022. <https://www.paho.org/pt/topicos/doencas-transmitidas-vetores>, acessado em 07/07/2023.
- [23] SLIMI, R.: *A cellular automata model for Chagas disease*. *Applied Mathematics and Computation*, 33(2):1072–1085, 2009. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X07003563>.
- [24] SOUZA, H. P. *et al.*: *Doenças infecciosas e parasitárias no Brasil de 2010 a 2017: aspectos para vigilância em saúde*. *Revista Panamericana de Salud Pública* [online], 44(e10):e–10, 2020. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2020.10>.
- [25] SOUZA, L. E. P. F.; BUSS, P. M.: *Desafios globais para o acesso equitativo à vacinação contra a COVID-19*. *Cadernos de Saúde Pública* [online], 37(9):e–00056521, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00056521>.
- [26] TAMITATO, M. *et al.*: *Homemade cloth face masks as a barrier against respiratory droplets – systematic review*. *Acta paul Enferm*, 33(eAPE20200103):eAPE20200103, 2020. DOI: 10.37689/acta-ape/2020AR0103.
- [27] WHITE, S. H. *et al.*: *Modeling epidemics using cellular automata*. *Applied Mathematics and Computation*, 186(1):193–202, 2007. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300306009295>.
- [28] WOLFRAM, E.: *Computation theory of cellular automata*. *Communications in Mathematical Physycs*, 96(1):15–57, 1984. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01217347>.