

DOI: 10.5902/2236583464164

Eficiência de diferentes estratégias de controle da pandemia da Covid-19 para a mesorregião do sul/sudoeste mineiro

Efficiency of different control strategies for the Covid-19 pandemic for the mesoregion of the south/southwest of Minas Gerais

Marcelo Domingos Marchesin, Júlia Marchesin Caetano

Como citar este artigo:

MARCHESIN, MARCELO D.; CAETANO, JÚLIA M.; Eficiência de diferentes estratégias de controle da pandemia da Covid-19 para a mesorregião do sul/sudoeste mineiro. Revista Saúde (Sta. Maria). 2021; 47 (1).

Autor correspondente:

Nome: Marcelo Domingos Marchesin
Telefone: : (31) 99214-2418
E-mail: mdm@mat.ufmg.br
Formação Profissional: : Bacharel em Matemática pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Mestre em Matemática Aplicada pela Universidade de Campinas (UNICAMP). Doutor em Matemática pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Pós-doutorado pela Universidad de Bio-Bio (UBBChile). Pós-doutorado pela UNESP-RIO CLARO. Professor (Associado IV) da UFMG desde 1997.

Filiação Institucional: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Endereço para correspondência:
Rua: Heitor Silva n°: 181
Bairro: Rio Branco
Cidade: Belo Horizonte
Estado: Minas Gerais
CEP: 31535-380

Data de Submissão:

08/02/2021

Data de aceite:

02/11/2021

Conflito de Interesse: Não há conflito de interesse



RESUMO

Neste artigo buscamos analisar os efeitos das políticas de controle da pandemia na mesorregião do sul/sudoeste de Minas Gerais. Usamos um modelo SEIR estruturado por idades com uma classe de quarentena e dois tipos de controle. O primeiro estuda a sensibilidade do número básico de reprodução, R_0 , em relação aos parâmetros e é calculado fazendo-se uso do método da nova geração. O segundo avalia diferentes estratégias de quarentena comparando o número total de mortos em cada caso. Foram analisadas diferentes estratégias de quarentena através dos dados coletados do recorte espacial estudado. Assim foi possível compreender as estratégias viáveis de quarentena para a região, popularmente chamada de Sul de Minas. Como resultado, dentre todas as observações indicadas, temos que o fator tempo é determinante na efetividade da estratégia de quarentena escolhida.

PALAVRAS-CHAVE: COVID-19; Número Básico de Reprodução; Quarentena.

ABSTRACT

In this article we seek to analyze the effects of the control policies for the pandemic in the southern/southwestern region of Minas Gerais. We use an age-structured SEIR model with a quarantine class and two types of controls. The first one studies the sensitivity of the basic reproduction number, R_0 , in relation to the parameters and is calculated using the new generation method. The second assesses different quarantine strategies by comparing the total number of deaths in each case. Different quarantine strategies were analyzed using the data collected from the studied spatial profile, so it was possible to understand the possible quarantine strategies for the region popularly called as Sul de Minas. As a result, among all the observations indicated, we have that the time factor is decisive in the effectiveness of the chosen quarantine strategy.

KEYWORDS: COVID-19; Basic reproduction number; Quarantine.

INTRODUÇÃO

A pandemia do novo coronavírus colocou em xeque muitos dos protocolos de enfrentamento a epidemias que o Brasil (e o mundo) adotavam como seguros. Hoje é possível enxergar cenários diferenciados quando tratamos de espaço público. Ao mesmo tempo, as contribuições teóricas e metodológicas que vêm sendo elaboradas nos últimos meses têm potencial de alavancar estratégias eficientes, caso a mesma situação volte a assolar o planeta.

As medidas de isolamento social, os novos protocolos de higiene e as estratégias tomadas por parte do poder público estão sendo avaliadas constantemente, em conjunto com o volume diário de dados que temos disponíveis sobre os efeitos da COVID-19 nos últimos 12 meses. Este artigo se propõe a apresentar uma análise das estratégias de controle da pandemia no recorte da região popularmente conhecida como Sul de Minas.

Através da análise de diversos parâmetros, nos propusemos a compreender como as estratégias de quarentena tomadas na região comportam-se, enquanto efetivas, na redução da disseminação do vírus SARS-CoV-2. A mesorregião sul/sudoeste do estado de Minas Gerais é composta majoritariamente por pequenos municípios com até 20 mil habitantes, sendo pouco expressivo o número de cidades com contingentes maiores que 100 mil habitantes. Entretanto, é uma região de extrema importância para o território mineiro, uma vez que se localiza entre dois estados de elevado destaque: Rio de Janeiro e São Paulo.

Os primeiros casos da doença em Minas Gerais apareceram no início de março de 2020, e logo se espalharam para as mais diversas regiões, chegando ao Sul de Minas em 20 de março. Desde então, medidas consideradas como as mais adequadas vêm sendo tomadas nas cidades da região, em diferentes graus de intensidade e controle. Uma ferramenta elementar para a avaliação dessas medidas é o cálculo do número básico de reprodução, conhecido por R_0 . O R_0 tem sido descrito como uma das métricas fundamentais e mais eficientes utilizadas para o estudo da dinâmica de doenças infecciosas¹.

O objetivo deste trabalho é avaliar através da análise de um modelo matemático de equações diferenciais a relevância de diferentes políticas públicas de controle à pandemia do COVID-19. Nós adaptamos as técnicas apresentadas em Castilho et al.² para estudar o caso particular referente à mesorregião do sul/sudoeste de Minas Gerais.

Serão avaliados qualitativamente os impactos de diferentes estratégias de controle e diretrizes baseados na análise matemática relacionados a diferentes medidas de política pública.

MÉTODOS

a O Modelo SEIRQ estruturado por faixa etária

Nesta seção apresentamos o modelo matemático que escolhemos utilizar neste trabalho. Iniciamos apresentando um argumento para justificar a escolha do sistema de equações diferenciais com extratificação por faixa etária.

O surto mundial de COVID-19 tem mostrado uma pequena proporção de crianças entre os casos reportados^{3,4}. Mais geralmente tem sido observado que o número de casos e o risco de enfermidade severa aumenta com a idade do indivíduo^{5,6,7}. Assim sendo, entender o papel da idade do indivíduo na transmissão e severidade da doença é fundamental para se determinar a probabilidade de sucesso de medidas de controle para redução da transmissão da doença⁸. Pelo acima exposto, nós optamos por utilizar nesta análise o clássico modelo SEIR acrescentando-se a ele, classes de quarentena como proposto em Jia et. al⁹. Também, uma vez que a idade é um fator importante na epidemia do COVID-19, será assumido que a população foi estruturada por idade^{10,11,12}. Nós consideraremos 3 faixas etárias: jovens com idade entre 0 e 19 ($i=1$) anos; adultos com idade entre 20 e 59 ($i=2$) anos e anciãos com idade acima de 60 anos ($i=3$). A proporção de cada faixa etária na população da mesorregião do sul/sudoeste mineiro é mostrada na tabela 1¹³.

Tabela 1 - Faixas etárias. Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas Gerais

Classe	Faixa Etária (anos)	% População	% Mortalidade (ano)	μ_i (ano)
1	[0,19]	25 %	2,65 %	0,77/1000
2	[20,59]	58 %	23,35 %	2,92/1000
3	[60,100]	17 %	74 %	31,56/1000

Denotemos por $S_i(t)$, $E_i(t)$, $I_i(t)$, $R_i(t)$ e $Q_i(t)$ o número de suscetíveis; expostos; infectados; removidos e quarentenados pertencentes a faixa etária i respectivamente no instante t medido em dias após o primeiro dia t_0 . As novas categorias aqui incluídas, $E_i(t)$ e $Q_i(t)$, dizem respeito aos expostos, $E_i(t)$: Indivíduos diretamente expostos ao vírus mas que não manifestam, no instante t , estarem infectados. Essa categoria diz respeito ao período de latência da doença, ou seja o período que vai da contaminação real até a constatação laboratorial inequívoca da contaminação. Também aqui considera-se a categoria dos quarentenados, $Q_i(t)$, ou seja, os indivíduos fisicamente isolados dos demais. O sistema de equações diferenciais a ser estudados é dado por:

$$\begin{aligned}
 Q'_i(t) &= p_i S_i(t) - \lambda_i Q_i(t), i = 1,2,3, \\
 S'_1(t) &= \Lambda - (\mu_1 + \rho_1) S_1(t) - S_1(t) \left(\sum_{j=1}^3 \beta_{1j} I_j(t) \right) \\
 &\quad - p_1 S_1(t) + \lambda_1 Q_1(t), \\
 S'_2(t) &= \rho_1 S_1(t) - (\mu_2 + \rho_2) S_2(t) - S_2(t) \left(\sum_{j=1}^3 \beta_{2j} I_j(t) \right) \\
 &\quad - p_2 S_2(t) + \lambda_2 Q_2(t), \\
 S'_3(t) &= \rho_2 S_2(t) - \mu_3 S_3(t) - S_3(t) \left(\sum_{j=1}^3 \beta_{3j} I_j(t) \right) \\
 &\quad - p_3 S_3(t) + \lambda_3 Q_3(t), \\
 E'_i(t) &= S_i(t) \left(\sum_{j=i}^3 \beta_{ij} I_j(t) \right) - (\sigma_i + \mu_i) E_i(t), i = 1,2,3, \\
 I'_i(t) &= \sigma_i E_i(t) - (\gamma_i + \mu_i + m_i) I_i(t), i = 1,2,3, \\
 R'_i(t) &= \gamma_i I_i(t) - \mu_i R_i(t), i = 1,2,3,
 \end{aligned} \tag{1}$$

Os parâmetros que aparecem no sistema acima seguem a notação apresentada em Castilho et. al. 2. As categorias Q_i têm a propriedade de remover indivíduos suscetíveis do processo epidêmico. Em particular, temos que p_i e λ_i são as taxas de entrada e saída da situação de quarentena da classe de faixa etária i , respectivamente. Assim, quando $p_i = \lambda_i = 0$ significa que não existe política alguma de quarentena e o sistema se reduz ao modelo SEIR estruturado por idade.

De acordo com o IBGE ¹³ a mesorregião do sul/sudoeste de Minas tem 11,66 nascimentos e 7,25 mortes para cada 1000 habitantes por ano. Isso representa um crescimento vegetativo diário de 0,0012%. Denotemos por N a população total da mesorregião (estimada em 2.602.522 em 2019) e por D o número total de mortes por ano, assim temos:

$$\frac{D}{N} = \mu = \frac{7,25}{1000}.$$

Assim μ_i é dado por:

$$\mu_i = \frac{D_i}{N_i} = \frac{D_i}{D} \frac{D}{N} \frac{N}{N_i} = \mu \frac{D_i}{D} \frac{N}{N_i} = 0,00725 \cdot \frac{(D_i/D)}{(N_i/N)}.$$

O estado de equilíbrio livre de doença é denotado por:

$$S_1^*, S_2^*, S_3^*, E_i = I_i = R_i = 0 \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

onde S_i^c denota o número de indivíduos da faixa etária i , ou seja, se a doença ainda não se manifestou então todos os indivíduos são suscetíveis (veja tabela 1). Denotando por Λ a taxa de recrutamento, no caso do modelo sem quarentena, somando-se as equações para o estado estacionário livre de doença temos:

$$S_1'(t) + S_2'(t) + S_3'(t) = (\Lambda - \mu_1 S_1(t) - \mu_2 S_2(t) - \mu_3 S_3(t)).$$

Assumimos que a população total seja constante e em equilíbrio demográfico e usamos os valores para a distribuição de população como sendo os valores de equilíbrio para obtermos:

$$\Lambda = \mu_1 S_1^* + \mu_2 S_2^* + \mu_3 S_3^* = 1,98 \times 10^{-5} \text{ mortes/dia}.$$

Tendo em vista nosso interesse em uma análise de curto prazo, podemos ignorar a taxa de crescimento populacional anual.

O equilíbrio demográfico acarreta que ρ_1 e ρ_2 : as taxas de sobrevivência da faixa etária 1 para 2 e de 2 para 3 respectivamente, devem satisfazer

$$\rho_2 = \frac{\mu_3 S_3^*}{S_2^*} = 9,25 \times 10^{-3} \quad \text{and} \quad \rho_1 = \frac{(\mu_2 + \rho_2) S_2^*}{S_1^*} = 28,23 \times 10^{-3}.$$

Os parâmetros do modelo SEIR com dinâmica vital são apresentado no Quadro 1. Se assumirmos que os parâmetros de demografia, doença e quarentena são os mesmos para todas as faixas etárias então o sistema acima se reduz ao SEIR clássico com o termo de quarentena como sugerido em Jia et al 9. Os parâmetros para o modelo SEIR clássico serão estimados de modo que o número de indivíduos infectados previsto pelo modelo se adeque bem às estatísticas divulgadas oficialmente. Esse conjunto de parâmetros será usado futuramente para ajustar o modelo estruturado por idade dado pelo sistema 1.

Quadro 1 - Parâmetros do modelo SEIR básico com dinâmica vital

Parâmetro	Descrição
p_i	Taxa de entrada em quarentena para a faixa etária i .
λ_i	Taxa de saída de quarentena para a faixa etária i .
Λ	taxa de recrutamento.
μ_i	taxa de morte natural para faixa etária i .
ρ_i	taxa de sobrevivência da faixa etária i para faixa etária $i+1$ $i \leq 2$.
β_{ij}	taxa de transmissão patogênica entre faixas etárias i e j .
σ_i	taxa à qual um exposto da faixa etária i se converte em um infectado.
γ_i	Taxa de recuperação de um indivíduo da faixa etária i .
m_i	taxa de morte patogênica induzida na faixa etária i .

b Modelo SEIR não estruturado

O modelo SEIR sem dinâmica vital e com termo de quarentena é dado pelas equações abaixo:

$$\begin{aligned}
 Q'(t) &= pS(t) - \lambda Q(t), \\
 S'(t) &= -\beta S(t)I(t) - pS(t) + \lambda Q(t), \\
 E'(t) &= \beta S(t)I(t) - \sigma E(t), \\
 I'(t) &= \sigma E(t) - \gamma I(t), \\
 R'(t) &= \gamma I(t).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Ignorando-se a categoria de quarentena, ou seja $p = \lambda = 0$, os parâmetros β , σ e γ podem ser ajustados de maneira que a curva SEIR se adeque aos dados. Para se conseguir isso a diferença entre a curva de infectados SEIR e o conjunto discreto que oficialmente nos fornece o número de indivíduos infectados é minimizada ¹⁴. Para a mesorregião do sul/sudoeste mineiro os parâmetros encontrados foram:

$$\beta^* = 0,656139, \quad \sigma^* = 1,42185 \quad e \quad \gamma^* = 0,095943$$

As condições iniciais usadas no algoritmo foram $\beta = 0,8481$, $\sigma = 0,2682$ e $\gamma = 0,0870$, que são exatamente os correspondentes valores encontrados na estimativa do caso brasileiro (ver Castilho et al ²). Como a mesorregião do sul/sudoeste mineira é um subconjunto do Brasil é razoável considerar os valores dos parâmetros nacionais como uma boa primeira aproximação para o caso particular que aqui estudamos. A figura 1 mostra os números oficiais de indivíduos infectados e a curva de infectados fornecida pelo modelo SEIR.

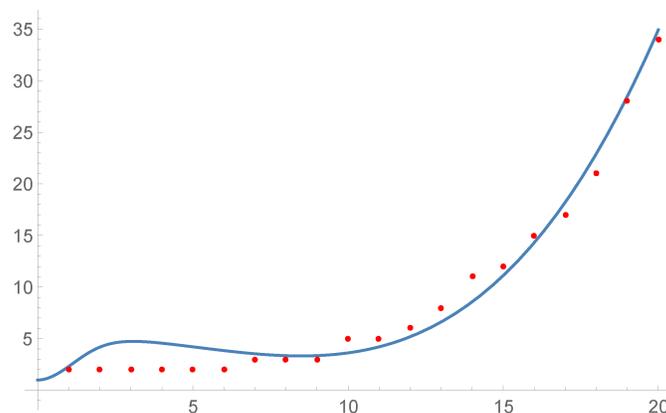


Figura 1 - Curva de infectados e os dados reais

O regime de quarentena será caracterizado por dois valores: p a taxa de entrada e λ taxa de saída. Maiores detalhes sobre estes parâmetros podem ser obtidos em Jia et al. ⁹.

Assumiremos que $p \in \left[0, \frac{4}{10}\right]$. Também assumiremos que o tempo para se deixar a quarentena será 30, 60, 120 ou 180 dias, ou seja: $1/\lambda \in \{30, 60, 120, 180\}$.

O efeito da quarentena na curva de prevalência é verificado de duas formas: primeiro ela diminui o ponto de máximo e segundo ela adia a data da sua ocorrência. Isto pode ser observado na figura 2.

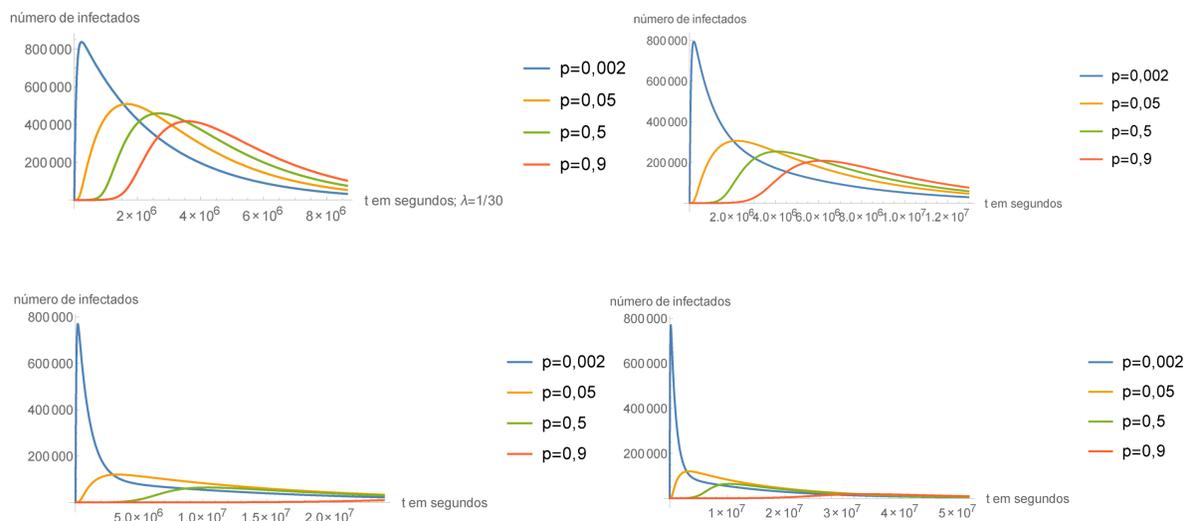


Figura 2 - Número de infectados para quarentena de 30 dias (superior esquerda), 60 dias (superior direita), 120 dias (inferior esquerda) e 180 dias (inferior direita) respectivamente para diversos valores de esforço de quarentena p.

Para analisar a eficiência da quarentena, o máximo da curva de prevalência como função do esforço de quarentena, p, são calculados e mostrados na figura 3.

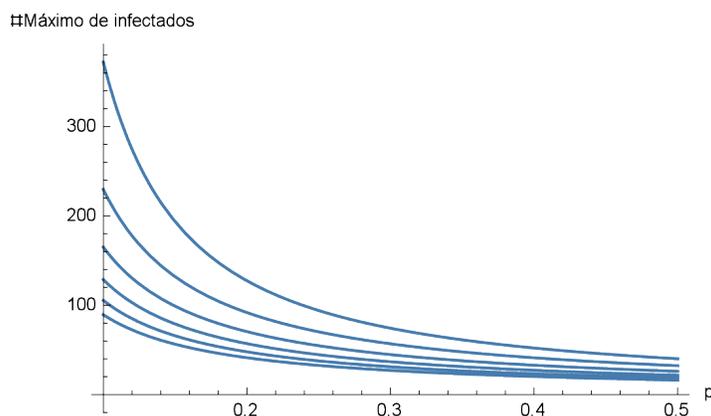


Figura 3 - Curvas dos números máximos de infectados como funções dos esforços de quarentena p. São usadas quarentenas de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias de duração

c Ajuste de parâmetros para o modelo estruturado

A curva $I(t)$, dada pelo modelo SEIR, prevê o número total de indivíduos infectados (sintomáticos e assintomáticos) no instante t . Contudo, para se estimar o número de indivíduos que vão necessitar de cuidados médicos é necessário saber o nível de subnotificação. Estimativas para o nível de subnotificação podem ser encontradas em Russel et al.¹⁵ e quanto à gravidade dos casos reportados¹⁶. Casos assintomáticos podem chegar a 75%¹⁵ de todos os casos; também a relação entre casos notificados e não notificados pode variar de "1 para 1" até "1 para 20"¹⁵. Essas incertezas devem ser levadas em consideração quando se usar o modelo para se fazer estimativas numéricas.

Devido aos diferentes pesos de cada faixa etária na composição da população total e também aos diferentes parâmetros epidêmicos para cada faixa, nossa análise permitirá avaliar o impacto da quarentena de cada faixa etária na dinâmica da epidemia. Antes de darmos prosseguimento, se faz necessário ajustarmos os parâmetros que usaremos para o modelo estruturado. Tal processo é conhecido como "*fitting*" (ajuste), porém, o neologismo já foi incorporado ao nosso vocabulário: "fitar dados".

d Fitamento de Dados (*Data Fitting*)

Vamos determinar os valores de 12 parâmetros para o modelo estruturado:

$$\sigma_i, \gamma_i, \beta_{ij} = \beta_{ji} i, j = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Faremos uso de um algoritmo que fita os parâmetros aos dados disponíveis referentes ao número total de casos relatados nos 20 primeiros dias contados a partir do registro do primeiro caso na mesorregião (20 de março de 2020) utilizando o método dos mínimos quadrados. A distância entre a curva prevista

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) + I_3(t) \quad (5)$$

e os dados são minimizados. É natural que os valores iniciais considerados para os parâmetros no processo de minimização sejam os mesmos utilizados no caso brasileiro (tabela 3 de Castilho et al.²).

Considerando-se c_i a porcentagem da população de cada faixa etária, isto é (veja tabela 1) $c_1=0.25$, $c_2=0.58$ e $c_3=0.17$. Os demais parâmetros foram então determinados (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros fitados para o modelo SEIR estruturado por idade sem dinâmica vital

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
β_{11}	1,65333	σ_1	0,00015
β_{12}	0,62230	σ_2	0,69356
β_{13}	1,42312	σ_3	0,77735
β_{22}	0,46138	γ_1	0,59223
β_{23}	0,47455	γ_2	0,09384
β_{33}	0,50426	γ_3	0,50376

e Estratégias de controles para o modelo estruturado por idade

As medidas de controle para o modelo estruturado por idade serão de dois tipos; o primeiro tipo controla os parâmetros da epidemia. Isso será feito através de uma análise da sensibilidade do número básico de reprodução: R_0 . Na próxima seção o parâmetro R_0 para modelo estruturado por faixa etária será apresentado, e, na sequência, uma análise numérica de sua dependência em relação aos diversos parâmetros que o compõem será realizada. O segundo tipo de controle será relacionado aos modelos de quarentena orientados pelas faixas etárias. Os parâmetros p_i^s determinam os esforços de quarentena para cada faixa etária, e, devido a diferentes pesos das faixas etárias na composição da população e os diferentes tipos de parâmetros referentes a cada uma delas, este estudo permite avaliar o impacto de cada faixa etária na dinâmica da epidemia.

RESULTADOS

a Análise da sensibilidade do R_0

Nesta seção nós estudamos a sensibilidade R_0 em relação a cada um dos parâmetros que o compõe¹⁷. Usamos a abordagem da próxima geração para estimarmos R_0 ¹⁸ dessa maneira, R_0 é dado pelo raio espectral ("maior autovalor") da matriz FV^{-1} , onde

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \beta_{11}S_1^* & \beta_{12}S_1^* & \beta_{13}S_1^* \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{21}S_2^* & \beta_{22}S_2^* & \beta_{23}S_2^* \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{31}S_3^* & \beta_{32}S_3^* & \beta_{33}S_3^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

e

$$V = \begin{pmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\sigma_1 & 0 & 0 & \tilde{D}_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_2 & 0 & 0 & \tilde{D}_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_3 & 0 & 0 & \tilde{D}_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

onde $D_i = \sigma_i + \mu_i$ e $\tilde{D}_i = \gamma_i + \mu_i + m_i$ para $i \in \{1,2,3\}$. Assim

$$FV^{-1} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{31} \end{pmatrix} \quad (8)$$

onde o bloco K_{11} é dado por

$$K_{11} = \begin{pmatrix} \frac{\beta_{11}\sigma_1 S_1^*}{\gamma_1 D_1 \bar{D}_1} & \frac{\beta_{12}\sigma_2 S_1^*}{\gamma_2 D_2 \bar{D}_2} & \frac{\beta_{13}\sigma_3 S_1^*}{\gamma_3 D_3 \bar{D}_3} \\ \frac{\beta_{21}\sigma_1 S_2^*}{\gamma_1 D_1 \bar{D}_1} & \frac{\beta_{22}\sigma_2 S_2^*}{\gamma_2 D_2 \bar{D}_2} & \frac{\beta_{23}\sigma_3 S_2^*}{\gamma_3 D_3 \bar{D}_3} \\ \frac{\beta_{31}\sigma_1 S_3^*}{\gamma_1 D_1 \bar{D}_1} & \frac{\beta_{32}\sigma_2 S_3^*}{\gamma_2 D_2 \bar{D}_2} & \frac{\beta_{33}\sigma_3 S_3^*}{\gamma_3 D_3 \bar{D}_3} \end{pmatrix} \quad (9)$$

e o bloco K_{12} é dado por

$$K_{12} = \begin{pmatrix} \frac{\beta_{11} S_1^*}{\bar{D}_1} & \frac{\beta_{12} S_1^*}{\bar{D}_2} & \frac{\beta_{13} S_1^*}{\bar{D}_3} \\ \frac{\beta_{21} S_2^*}{\bar{D}_1} & \frac{\beta_{22} S_2^*}{\bar{D}_2} & \frac{\beta_{23} S_2^*}{\bar{D}_3} \\ \frac{\beta_{31} S_3^*}{\bar{D}_1} & \frac{\beta_{32} S_3^*}{\bar{D}_2} & \frac{\beta_{33} S_3^*}{\bar{D}_3} \end{pmatrix} \quad (10)$$

e K_{21} e K_{22} são as matrizes nulas de tamanho 3×3 . Os autovalores de FV^{-1} são facilmente calculados devido a estrutura de bloco desta matriz. Porém, devido ao grande número de parâmetros, nós preferimos realizar esta análise de forma numérica.

Figuras 4 e 5 mostram a dependência de R_0 em relação aos parâmetros que o compõem. O uso dos parâmetros do modelo SIR clássico como variáveis de controle foi estudado em Castilho¹⁹ e aqui seguiremos a mesma linha de investigação. Medidas de distanciamento social, uso de máscaras de proteção, luvas, etc. têm o efeito de reduzir as taxas de contato β_{ij} . A identificação de indivíduos infectados através de testes, verificação de

temperatura corporal, etc., e a colocação deles em quarentena têm o papel de aumentar as taxas de remoção γ_i s. Finalmente observamos que os parâmetros σ_i s não podem ser controlados.

As velocidades de decrescimento das taxas de remoção, são bastante semelhantes para as faixas etárias dos jovens e dos anciãos, porém o gráfico para a faixa etária dos adultos mostra uma maior velocidade de decrescimento para este grupo (veja Figura 4a).

A taxa de contágio correspondente à faixa etária dos jovens cresce muito mais rapidamente que a correspondente as demais (veja Figura 4b).

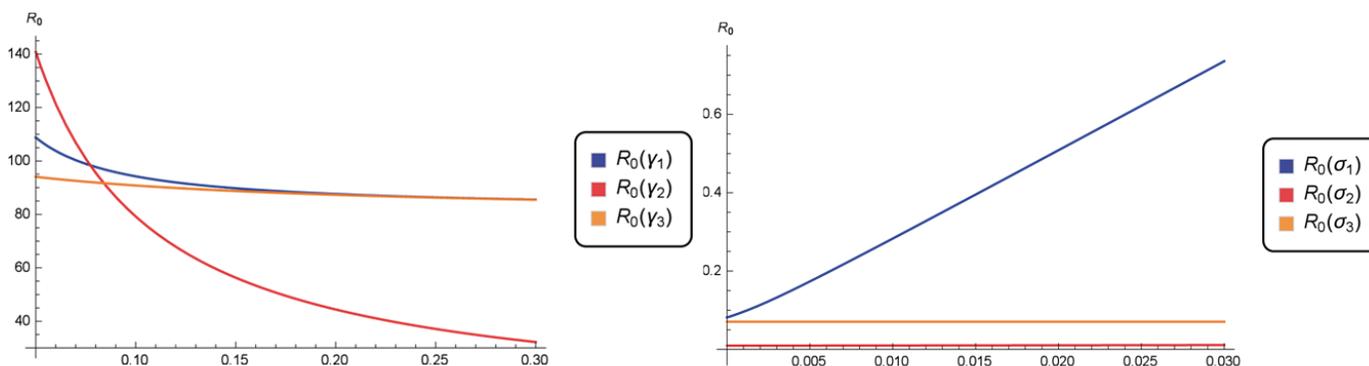


Figura 4 - Curvas distintas mostram qual γ_i está variando: $R_0(\gamma_i)$ (4a); Curvas distintas mostram qual σ_i está variando: $R_0(\sigma_i)$ (4b).

Considerando-se os contatos diretos entre indivíduos de uma mesma faixa etária, R_0 é mais sensível às variações ocorridas entre adultos. (veja Figura 5a).

Em relação ao contato direto entre indivíduos de faixas etárias distintas, R_0 têm sensibilidades semelhantes relativas a β_{13} e β_{23} . No entanto contatos diretos entre adultos e crianças causam maior variação em R_0 (veja Figura 5b).

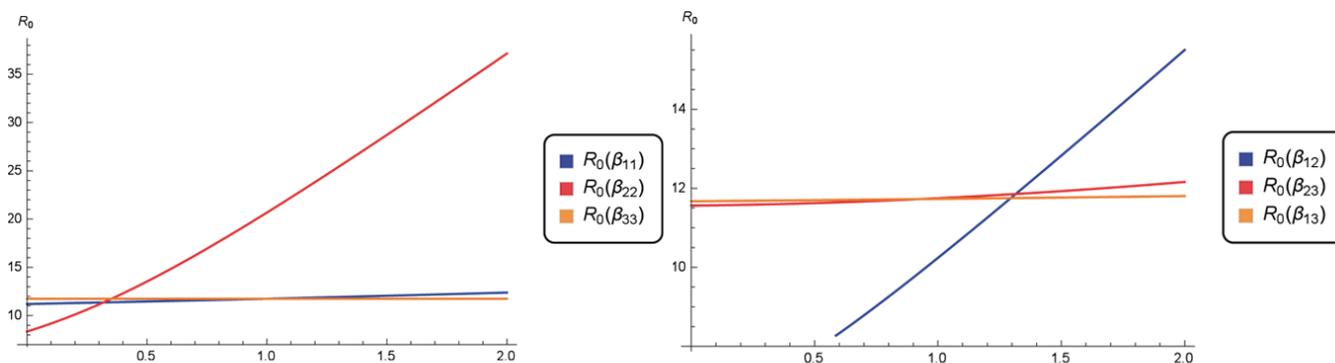


Figura 5 - Curvas distintas mostram qual β_{ii} está variando: $R_0(\beta_{ii})$ (5a); Curvas distintas mostram qual β_{ij} está variando: $R_0(\beta_{ij})$ (5b).

DISCUSSÃO

a Análise de estratégias de quarentena

Nesta seção estudaremos o impacto de diferentes estratégias de quarentena. A taxa de mortalidade induzida pela doença foi levada em conta ao considerarmos o número de mortes como uma fração do número de casos recuperados. As taxas de mortalidades das diferentes faixas etárias foram estimadas utilizando-se os dados obtidos a partir do Painel de Monitoramento da COVID-19 da Secretaria de Saúde do Estado de Minas Gerais 20, estão atualizados até o dia 22/09/2020 e são apresentados na Tabela 3. Como mencionado anteriormente (seção *refitting*), I_1 , I_2 e I_3 incluem indivíduos sintomáticos, assintomáticos, bem como os casos não reportados, de maneira que as taxas de mortalidade serão multiplicadas por 0.25 (visto que apenas 25% dos indivíduos infectados são sintomáticos 21) e por 1/20 (devido a sub-notificação de casos 15). Isto nos deixa com um fator multiplicativo de $\phi = 0.25 * (1/20) = 0.0125$ para uma boa estimativa do número de mortes.

Tabela 3 - Taxa de mortalidade para o modelo estruturado por idade

Faixa Etária	Número de casos	Mortes	% de Mortes
1	1846	0	0,01 %
2	16379	106	0,65 %
3	5053	468	9,26 %

Assim, nós podemos estudar o impacto das políticas públicas de quarentena em função dos parâmetros λ e p_i , para $i \in \{1,2,3\}$. Denotando p o esforço de quarentena para o modelo não estruturado, consideraremos:

$$p_1 + p_2 + p_3 = p.$$

Faremos a análise de 4 conjuntos de valores para os parâmetros p_i ; como detalhados no quadro 2. A estratégia de controle, onde nenhuma tipo de quarentena é implementado é apresentada como S_0 . A primeira estratégia, S_1 , divide o esforço de quarentena igualmente entre as 3 faixas etárias. A estratégia S_2 enfatiza um isolamento mais forte dos anciãos (duas vezes maior do que os demais grupos). A estratégia S_3 reforça o isolamento dos jovens e dos adultos duas vezes mais do que para os anciãos. A estratégia S_4 duplica a quantidade de esforço de quarentena nos adultos em comparação com os demais grupos. Para uma melhor análise das diferentes estratégias de quarentena, para cada valor fixado de p , cada estratégia de controle será calculada para diferentes períodos de tempo: $1/\lambda \in \{30,45,60,90\}$.

Quadro 2 - Estratégias de quarentena

Estratégia	Escolhas para p_i		
S1	$p_1 = p/3$	$p_2 = p/3$	$p_3 = p/3$
S2	$p_1 = p/6$	$p_2 = p/6$	$p_3 = 2p/3$
S3	$p_1 = 2p/5$	$p_2 = 2p/5$	$p_3 = p/5$
S4	$p_1 = p/6$	$p_2 = 2p/3$	$p_3 = p/6$

A estimativa do número de mortes pode ser feita multiplicando-se o número de recuperados ao final da pandemia em cada uma das 3 faixas etárias pela taxa de mortalidade da tabela 3 e pelo fator multiplicativo ϕ .

A tabela 4 apresenta os valores correspondentes à mesorregião. Os números na tabela correspondem às médias dos números de mortos por dia ao longo do período de duração da respectiva quarentena e à correspondente faixa etária considerando-se as diversas estratégias. Exceto para a faixa etária correspondente aos jovens, os demais valores foram arredondados para números inteiros. Ainda, na tabela 4 o valor escolhido foi $p=0,2$, no entanto, simulações numéricas realizadas para diversos outros valores de p não mostraram mudanças significativas no número médio de mortes em qualquer das estratégias analisadas.

Tabela 4 - Proporção de mortes para cada faixa etária para diferentes estratégias e durações de quarentena

λ	Faixa Etária	S0	S1	S2	S3	S4
1/30	1	0	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047
	2	2	2	2	2	2
	3	54	54	54	54	54
	Total	56	56	56	56	56
1/45	1	0	0,00047	0,00048	0,00048	0,000477
	2	1	1	1	1	1
	3	45	45	45	45	45
	Total	46	46	46	46	46
1/60	1	0	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047
	2	1	1	1	1	1
	3	38	38	38	38	38
	Total	39	39	39	39	39
1/90	1	0	0,00046	0,000472	0,000468	0,000468
	2	0	0	0	0	36
	3	27	27	27	27	27
	Total	27	27	27	27	27

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Introduzimos um sistema de equações diferenciais estratificado por faixas etárias onde os parâmetros apresentados foram fitados a partir dos dados oficialmente divulgados pelo governo de Minas Gerais sobre os números relacionados à contaminação pela Covid-19 na mesorregião do sul/sudoeste mineiro.

A partir dos parâmetros fitados, o número básico de reprodução R_0 foi calculado utilizando-se a abordagem de segunda geração e uma análise da sensibilidade de R_0 em relação a estes parâmetros foi realizada de forma numérica.

Através desta análise podemos concluir que:

1. Com relação às taxas de remoção, (parâmetros γ_i 's) verificamos que as faixas etárias dos jovens e dos anciãos apresentam velocidades de decrescimento semelhantes. Porém o gráfico para a faixa etária dos adultos mostra uma maior velocidade de decrescimento para este grupo (veja Figura 4a). Recomenda-se assim que os adultos sejam priorizados no processo de testagem.

2. A taxa de contágio (parâmetros σ_i 's) correspondente à faixa etária dos jovens causa um crescimento no valor de R_0 muito maior do que as taxas de contágio referentes aos adultos e idosos. (veja Figura 4b). Isso justificaria a recomendação de que os jovens sejam mais cuidadosos e mantenham distanciamento social efetivo.

3. As taxas relacionadas aos contatos diretos entre indivíduos de uma mesma faixa etária, (parâmetros β_{ii} 's) mostram que R_0 é mais sensível às variações ocorridas entre adultos (veja Figura 5a). Isso poderia justificar uma ênfase maior no incentivo ao trabalho no sistema "home-office". Também seria um argumento para a liberação de aulas presenciais e nos dá um alento em relação às nossas preocupações de contágio em casas de acolhimento de idosos.

4. Em relação ao contato direto entre indivíduos de faixas etárias distintas, (parâmetros β_{ij} 's), verificamos que R_0 têm sensibilidades semelhantes relativa a β_{13} e β_{23} . No entanto contatos diretos entre adultos e crianças causam maior variação em R_0 (veja Figura 5b). Esse seria um argumento contrário à liberação de aulas presenciais pois colocaria em risco os professores e funcionários da escola bem como abriria possibilidade de trazer o contágio da escola para os lares.

Para finalizar, o impacto de campanhas de isolamento orientadas às diferentes faixas etárias considerando diferentes estratégias e diferentes valores de p para o esforço total da campanha foram analisadas. Nossa análise não mostrou qualquer vantagem significativa entre qualquer uma das 5 estratégias de quarentena propostas. Por outro lado, mostrou que as quarentenas são tão mais eficientes na prevenção de mortes quanto mais longas forem e puderem ser implementadas, abrangendo igualmente todas as faixas etárias consideradas.

Observe que o número médio de mortes por dia cai de 56 para 27 quando se considera uma quarentena de 90 dias ao invés de uma quarentena de 30 dias, independentemente da estratégia utilizada. Além disso, podemos notar que uma quarentena de 30 dias não tem efeito nenhum na diminuição do número médio de mortes por dia quando comparada à situação de não-quarentena (estratégia S_0) (veja tabela 4).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos imensamente a Margareth Marchesin pela revisão e colaboração ao texto, ao Instituto Federal do Sul de Minas e ao Grupo de Estudos em Planejamento Territorial e Ambiental (GEPLAN) pelo apoio imprescindível à elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

1. DELAMATER PL, STREET EJ, LESLIE TF, YANG YT, JACOBSEN KH. Complexity of the Basic Reproduction Number. *Emerging Infectious Diseases*..
2. Castilho JM, Gondim M, Marchesin M, Sabeti M. Assessing the efficiency of different control strategies for the COVID-19 epidemic. *EJDE*..
3. Sun K, Chen J, Viboud C. Early epidemiological analysis of the coronavirus disease 2019 outbreak based on crowdsourced data: a populational-level observational study. *The Lancet Digital Health*..
4. Team TNCPERE. The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (co-vid-19) in China. *China CDC Weekly*..
5. Cereda D, Tirani M, Rovida F, Demicheli V, Ajelli M, Poletti P, et al. The early phase of the covid-19 outbreak in Lombardy, Italy. *arXiv e-prints*..
6. Shim E, Tariq A, Choi W, Lee Y, Chowell G. Transmission potential and severity od Covid-19 in South Korea. *International Journal of Infectious Diseases*.

7. Zhao X, Zhang B, Li P, Ma C, Gu J, Hou P, et al. Incidence, clinical characteristics and prognostic factor of patients with Covid-19: a systematic review and meta-analysis. MedRxiv..
8. Davies NG, Klepac P, Liu Y, Prem K, Jit M, Eggo RM, et al. Age-dependent effects in the transmission and control of Covid-19 epidemics. MedRxiv..
9. Jia J, Ding J, Liu S, Liao G, Li J, Duan B, et al. Modeling the control of Covid-19: Impact of policy interventions and meteorological factors. Electron. J. Differential Equations. : p. 1-24.
10. Castillo-Chavez C, Hethcote HW, Andreasen V, Levin SA, Liu WM. Epidemiological models with age structure, proportionate mixing, and cross-immunity. Journal of Mathematical Biology. : p. 233-258.
11. Inaba H. Mathematical analysis of an age-structured SIR epidemic model with vertical transmission. Discrete & Continuous Dynamical Systems..
12. Thieme H. Disease extinction and disease persistence in age structured epidemic models. Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications..
13. Estatística-SIDRA IBdG. [Tabela 2684 - Óbitos, por ano de ocorrência, natureza do óbito, sexo, idade, local de ocorrência e lugar do registro].; 2019. Acesso 20 de Julho de 2020. Disponible en: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2684>.
14. Martcheva M. An Introduction to Mathematical Epidemiology: Springer; 2015.
15. RUSSELL TW, GOLDING N, HELLEWELL J, ABBOTT S, PEARSON CAB, VAN ZANDVOORT K, et al. Using a delay-adjusted case fatality ratio to estimate under-reporting..
16. España Cdcdaysg. Efermedad por el coronavirus (Covid-19). [Online]; 2020. Acesso 4 de Abril de 2020. Disponible en: https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Actualizacion_52_COVID-19.pdf.

17. Chitnis N, Hyman JM, Cushing JM. Determining important parameters in the spread of malaria through the sensitivity analysis of a mathematical model. *Bulletin of mathematical biology*..
18. Dietz K. The Estimation of the Basic Reproduction Number for Infectious Diseases. *Statistical methods in medical research*. : p. 23-41.
19. Castilho C. Optimal control of an epidemic through educational campaigns. *Electron J. Differential Equations*. : p. 1-11.
20. Gerais SdSdM. [Painel de Monitoramento dos Casos].; 2020. Acesso 22 de Setembro de 2020. Disponível em: <https://coronavirus.saude.mg.gov.br/painel>.
21. Day M. Covid-19: four fifths of cases are asymptomatic, China figures indicate. *The BMJ*..
22. Diekmann O, Heesterbeek JAP, Metz J. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations. *Journal of Mathematical Biology*. : p. 365-382.