

FORÇA-TAREFA DE MODELAGEM DA COVID-19

Relatório

**Análise do efeito das medidas de contenção à
propagação da COVID-19 em Belo Horizonte
(23/03 a 29/03)**

02 de Abril de 2020

Integrantes da Força-Tarefa:

Alexandre Celestino Leite Almeida	DEFIM - CAP UFSJ
Armando Gil Magalhães Neves	Dep. de Matemática - UFMG
Claudia Regina Lindgren Alves	Dep. de Pediatria - UFMG
Denise Bulgarelli Duczmal	Dep. de Matemática - UFMG
Eduardo Luiz Gonçalves Rios-Neto	Dep. de Ciências Econômicas - UFMG e IBGE
Felipe Carvalho Álvares da Silva	Doutor em Estatística - UFMG
Flávia Magalhães	Médica
Flávio Vinícius Diniz de Figueiredo	Dep. de Ciência da Computação - UFMG
Gustavo Andres Guerrero Eraso	Dep. de Física - UFMG
Iury Valente de Bessa	Doutorando em Eng. Elétrica - UFMG
Ivair Ramos Silva	Dep. de Estatística - UFOP
José Irineu Rangel Rigotti	Dep. de Demografia - UFMG
Luiz Alberto Queiroz Cordovil Júnior	Doutorando em Eng. Elétrica - UFMG
Luiz Henrique Duczmal	Dep. de Estatística - UFMG
Marcelo Martins de Oliveira	DEFIM - CAP UFSJ
Márcia Luciana da Costa Peixoto	Doutoranda em Eng. Elétrica - UFMG
Márcio Feliciano Braga	Dep. de Eng. Elétrica - UFOP
Marcos Flavio Silveira Vasconcelos D'Angelo	UNIMONTES
Martin Gomez Ravetti	Dep. de Ciência da Computação - UFMG
Murilo Cesar Osorio Camargos Filho	Doutorando em Eng. Elétrica - UFMG
Pedro Callado Versiani de Souza Ferreira	Matemático Computacional - UFMG
Pedro Henrique Silva Coutinho	Doutorando em Eng. Elétrica - UFMG
Reinaldo Martinez Palhares	Dep. de Eng. Eletrônica - UFMG
Renato Moreira Hadad	Dep. de Geografia - PUC-MG
Ricardo Hiroshi Caldeira Takahashi	Dep. de Matemática - UFMG
Roberto Colombari	Engenheiro
Ronald Dickman	Dep. de Física - UFMG
Silvio Costa Ferreira	Dep. de Física - UFV
Tiago Alves Schieber de Jesus	Dep. de Ciências Administrativas - UFMG
Wagner Meira Jr.	Dep. de Ciência da Computação - UFMG

Resumo

Mesmo antes de a Prefeitura de Belo Horizonte decidir alterar temporariamente as regras de funcionamento dos serviços na cidade, como forma de promover o isolamento social, a população já vinha praticando uma série de medidas preventivas para conter a propagação da epidemia da COVID-19.

Este Relatório apresenta resultados de estudos preliminares que visam avaliar o efeito dessas primeiras medidas de isolamento social, anteriores àquelas que entraram em vigor no dia 22/03, sobre a dinâmica de propagação da epidemia. A partir dos dados referentes ao período de 23/03 até 29/03 (que ainda não refletem as medidas tomadas em 22/03), é avaliada a possibilidade de se estimar valores para a taxa de transmissão da doença. Considerando tais estimativas, são simulados cenários futuros possíveis de evolução do número de infectados e da demanda por internação hospitalar, visando indicar a faixa de variação das previsões que podem ser feitas neste momento, com os dados até agora disponíveis.

Foram empregadas duas abordagens distintas para a obtenção de estimativas para a nova taxa de transmissão da doença:

- O modelo SEIR anteriormente empregado, descrito no Relatório de 24/03 desta força-tarefa, foi primeiramente recalibrado. Assume-se que os parâmetros ajustados para o período inicial, até 22/03, permaneçam constantes nos momentos posteriores, com exceção da taxa de transmissão, que é afetada pelas medidas de isolamento social. Por meio de diferentes processos de ajuste dos dados referentes ao período de 24/03 a 29/03, são obtidas estimativas da nova taxa de transmissão β , que são então utilizadas para a simulação de cenários futuros.
- Uma outra abordagem foi a estimação da taxa de reprodução $R(t)$ por uma técnica Bayesiana. Esse tipo de modelagem faz uso de uma sequência de simulações estocásticas da evolução da epidemia, com transições descritas por distribuições de probabilidade adequadamente escolhidas, que visam reproduzir a evolução observada do número de infectados. Os dados assim obtidos permitem estimar $R(t)$. Uma vez determinado o valor desse parâmetro, o valor da taxa de transmissão é obtido dividindo-se R pela duração média do estado infeccioso nas pessoas que contraíram a doença. Essa aproximação é válida durante o início da epidemia. A série de valores de $\beta(t)$ assim obtida é então utilizada na simulação de cenários futuros.

Nas duas abordagens empregadas, a magnitude da incerteza envolvida na estimação da taxa de transmissão é expressiva, o que conduz a cenários

futuros possíveis bastante distintos (o que indica elevado grau de incerteza quanto à evolução futura dos acontecimentos). No entanto, algumas indicações parecem emergir das análises:

- O cenário de pior caso possível, basicamente correspondente à situação em que nenhuma medida de isolamento social fosse adotada, parece neste momento fora do horizonte de possibilidades. As medidas de prevenção, iniciadas ainda antes da data de 22/03, parecem ter surtido efeito positivo, tornando implausível a ocorrência desse pior caso.
- No entanto, basicamente todos os cenários que se apresentam como possíveis ainda projetam expressiva sobrecarga sobre o sistema de saúde. Em todos eles, o pico da necessidade de leitos hospitalares para atendimento aos pacientes com COVID-19 parece ser expressivamente maior que a capacidade atualmente instalada. A magnitude da sobrecarga, assim como o momento em que ocorre o seu pico, variam significativamente de um cenário para o outro.
- Serão necessários mais alguns dias antes que se possa saber o efeito das medidas de isolamento social colocadas em prática a partir de 22/03, as quais ainda não se encontram refletidas nos dados até agora disponíveis. É recomendável a cautela, pelo menos até que seja possível uma avaliação mais precisa da situação.

Em síntese, as análises aqui apresentadas sugerem como conclusão que, embora as medidas preventivas adotadas espontaneamente pela população tenham surtido um efeito positivo, parece ser de fato necessária a implementação de medidas pelo poder público que sejam de aplicação compulsória e possam garantir o sustento das famílias durante o período de isolamento social. Só assim parece possível reduzir ainda mais a taxa de transmissão desta epidemia, assim viabilizando o atendimento adequado à maioria daqueles que necessitam de hospitalização.

Por fim, deve-se recomendar que a leitura das análises aqui apresentadas seja feita com a devida cautela, principalmente tendo em vista que tais análises pressupõem uma relativa consistência na coleta dos dados referentes ao número de casos confirmados da doença. Embora tais análises não requeiram o conhecimento do número exato de casos, sendo suficiente um conhecimento de natureza amostral, é necessário que a amostragem realizada com os testes seja capaz de acompanhar proporcionalmente a variação real do número de casos. Do contrário, as projeções aqui apresentadas podem estar severamente subestimadas.

Tabela 1: Número acumulado de casos confirmados no município de Belo Horizonte.

data	número acumulado
16/03	1
17/03	5
18/03	10
19/03	18
20/03	20
21/03	30
22/03	60
23/03	87
24/03	90
25/03	96
26/03	118
27/03	130
28/03	157
29/03	163

1 Dados disponíveis

O conjunto de dados a serem analisados é apresentado na Tabela 1. A Figura 1 mostra um gráfico com esses dados. Desde o dia 29/03 não são disponibilizadas atualizações do número de casos confirmados no município de Belo Horizonte, de forma que não é possível analisar a evolução desse número nos últimos três dias.

Fica aparente, por inspeção visual, a existência de algum evento entre o dia 22/03 e o dia 25/03 que causou um incremento abrupto do registro de novos casos confirmados. Não é possível saber, sem informações adicionais, se se trata de um evento real, envolvendo a chegada simultânea ao município de cerca de 15 indivíduos que já estariam contaminados alguns dias antes da data de 21/03, ou se essa aparente descontinuidade no padrão de crescimento dos casos seria devida a algum atraso na liberação de resultados de testes (nessa hipótese, os resultados de um conjunto de exames feitos durante vários dias teriam ficado retidos, sendo liberados em bloco no dia 22/03). As consequências da existência dessa descontinuidade nos dados são difíceis de avaliar com precisão. Procedimentos *ad-hoc* serão empregados aqui para tratar a incerteza proveniente dessa fonte.

A partir do dia 22/03 passaram a vigorar normas de funcionamento dos serviços no município de Belo Horizonte, visando produzir um isolamento social capaz de reduzir a taxa de transmissão da epidemia. Deve-se ter claro que existe um retardo entre a execução de uma ação para reduzir a taxa de transmissão e a manifestação dos efeitos dessa ação nos números de casos confirmados da doença. Tal retardo é causado pelos seguintes fatores:

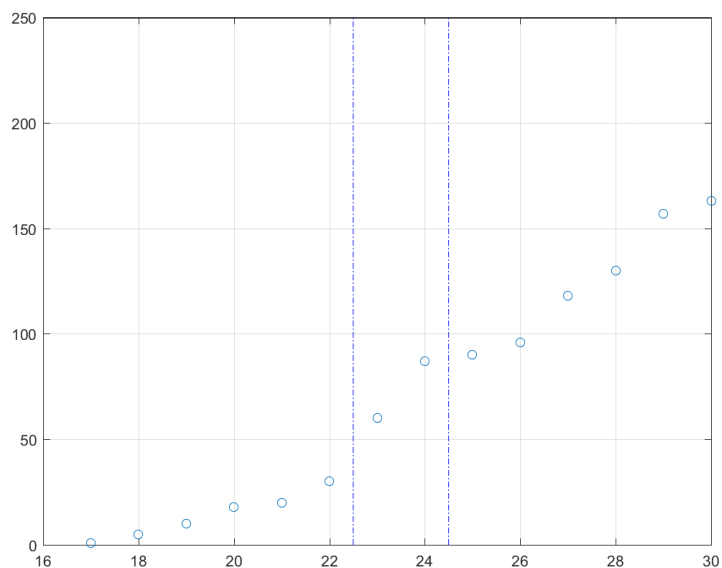


Figura 1: Valor acumulado do número de casos confirmados no município de Belo Horizonte no período de 18/03 a 29/03.

- Entre o momento em que um indivíduo tem contato com o vírus e o momento em que manifesta os primeiros sintomas há um retardo devido ao período de incubação da doença (no modelo aqui considerado, esse retardo é em média de 3.69 dias).
- Entre o momento no qual surgem os primeiros sintomas e o momento no qual o indivíduo procura a rede de saúde há um retardo de alguns dias (esse retardo não é modelado de maneira explícita no modelo aqui considerado). Há uma estimativa de que esse retardo seja em média de três dias, considerando dados da China.
- Dado que o indivíduo procurou o sistema de saúde e houve a indicação de testagem imediata para a COVID-19, o resultado do teste demora vários dias. Não há dados disponíveis sobre a demora que vem sendo praticada, mas relatos dispersos parecem sugerir que um retardo mínimo de cinco dias esteja ocorrendo nessa etapa do processo.
- Uma vez que o resultado seja positivo, há um retardo adicional de pelo menos um dia até que o registro do resultado seja contabilizado nas estatísticas oficiais.

Portanto, entre o início da adoção de medidas que causem a redução da taxa de transmissão do vírus e o efeito dessas medidas na contagem de casos

confirmados da doença, devem decorrer pelo menos 12 dias. Neste momento, dez dias após a adoção das referidas normas que modificam o funcionamento dos serviços no município de Belo Horizonte, ainda não deve ser possível mensurar os efeitos de tais normas na contagem de novos casos da doença.

A série de dados, no entanto, sugere ter ocorrido uma modificação no padrão da propagação da epidemia pouco após o dia 20/03, com a redução da velocidade dessa propagação. A explicação para tal redução parece estar relacionada com uma série de ações, iniciadas por volta do dia 12/03:

- A suspensão das aulas nas escolas de educação básica e superior;
- O cancelamento de eventos (artísticos, esportivos, comerciais, etc);
- A expansão do trabalho remoto (homework) por empresas diversas;
- A divulgação maciça, para o grande público, de informações sobre a epidemia e sobre mecanismos de prevenção do contágio.

O efeito de tais ações, conforme discutido acima, provavelmente começa a afetar a contagem de casos confirmados da COVID-19 por volta do dia 24/03.

2 Determinação do fator de redução da taxa de transmissão - Abordagem 1

O objetivo das medidas de isolamento social que foram adotadas em várias cidades e vários estados do país, a maioria iniciada por volta do dia 22/03, é o de obter uma redução do valor da taxa de transmissão, β , da epidemia da COVID-19. Conforme será discutido mais adiante, o efeito de tais medidas só deverá começar a se refletir em alterações na curva do número de novas infecções confirmadas dentro de mais alguns dias. No entanto, medidas de prevenção começaram a ser adotadas espontaneamente pela população por pelo menos dez dias antes da data de 22/03. Neste momento, já devem estar produzindo resultados mensuráveis em termos de redução do que seria o aumento esperado do número de casos se tais medidas não estivessem sendo adotadas. Este Relatório procura examinar o efeito dessas mudanças ocorridas antes de 22/03.

Neste Relatório, os dados medidos do número de novas infecções confirmadas da doença na cidade de Belo Horizonte registrados no período de 23/03 a 29/03 são utilizados para a realização de estimativas preliminares do fator de redução da taxa de transmissão β obtido com as primeiras medidas aplicadas. Deve-se ressaltar que a estimação de parâmetros com tão poucos pontos, em um contexto de elevada incerteza nos valores medidos, leva a estimativas sujeitas também a grande incerteza. As técnicas aqui utilizadas procuram produzir informação a respeito da magnitude dessas incertezas.

2.1 Avaliação da taxa de transmissão

Conforme já discutido no Relatório de 24/03, a série de dados que descreve o número acumulado de casos confirmados da doença no município de Belo Horizonte é constituída de números muito pequenos até o dia 18/03. Para evitar as dificuldades com a geração de estimativas a partir de muito poucos dados, a parte inicial da curva de crescimento teve sua parametrização ajustada utilizando a série de dados do número acumulado de casos no Brasil. Fazendo a suposição de que os parâmetros assim obtidos seriam aplicáveis ao município de Belo Horizonte, o ajuste do modelo aos dados observados no município no período de 16/03 a 21/03 é feito com o simples ajuste das condições iniciais, que são tratadas como uma proporção das condições iniciais empregadas para o Brasil.

As estimativas de novos valores para a taxa de transmissão β são feitas considerando como modelo básico esse modelo inicial. A primeira abordagem utilizada para se obter estimativas do fator de redução da taxa de transmissão foi baseada na premissa simplificadora de que, a partir de 24/03, o valor da nova taxa de transmissão seria dado por:

$$\beta = \rho\beta_0$$

De acordo com essa simplificação, a taxa de transmissão assumiria um novo valor constante a partir de 23/03. O procedimento de ajuste consistiria em encontrar o multiplicador ρ que significa o fator de redução na taxa de transmissão, obtido com as medidas de isolamento social.

Um complicador para a execução de tal procedimento ocorre devido à presença do problema anteriormente discutido, em que o padrão seguido pela série de dados se modifica abruptamente nos dias 22/03 e 23/03. A hipótese de que nessas datas tenha ocorrido a liberação de resultados que tivessem ficado retidos por vários dias implicaria que toda a parcela anterior da série estaria subestimada. É claro que, nesse cenário, seria elevada a chance de que também ocorressem problemas em números posteriores. Uma forma relativamente conservativa de tratar esse problema é modificar as condições iniciais das simulações, multiplicando essas condições por um fator que produzisse o ajuste do ponto mais discrepante (o ponto correspondente ao dia 23/03).

Assim, a abordagem aqui empregada para lidar com as incertezas presentes no conjunto de dados foi a de determinar valores para β que produzissem uma “envoltória” para os dados. Ajustando apenas os dados referentes ao período de 25/03 a 29/03, foram obtidos:

- $\rho_{min} = 0.35$
- $\rho_{max} = 0.45$

As curvas obtidas com esses multiplicadores foram então deslocadas verticalmente, com a mudança nas condições iniciais do sistema de equações, de

forma a que estas ajustassem o dado mais discrepante, correspondente ao dia 23/03. As curvas assim construídas são exibidas na Figura 2.

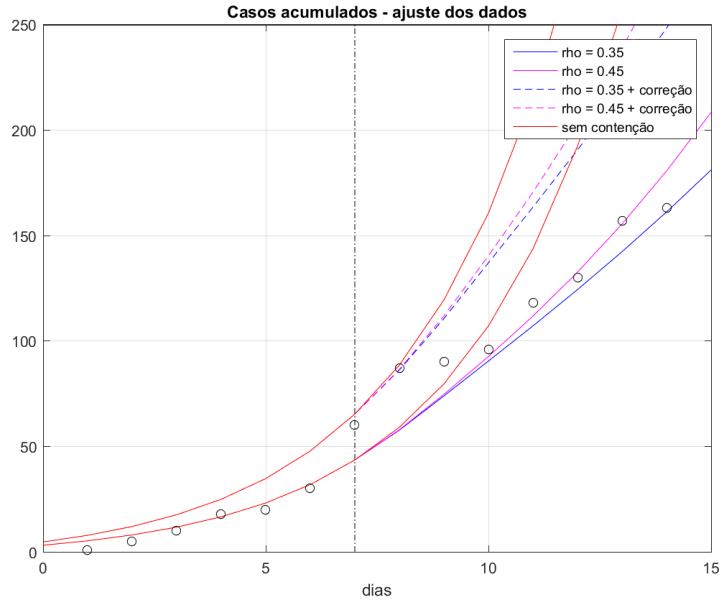


Figura 2: Superposição da curva do número acumulado de casos reportados previstos pelo modelo ajustado com os pontos correspondentes aos valores acumulados do número de casos confirmados. A partir do dia 22/03 (dia indicado por uma linha vertical), são mostradas projeções considerando $\rho = 0.35$ (curvas em azul) e $\rho = 0.45$ (curvas em magenta), para diferentes condições iniciais. As curvas tracejadas correspondem aos cenários em que foram modificadas as condições iniciais para que os modelos passassem a ajustar o ponto referente ao dia 23/03. Também são mostradas, em vermelho, as curvas referentes a cenários em que não houvesse qualquer medida de isolamento social. O tempo $t = 0$ corresponde à data de 15/03.

Na Figura 2, são mostradas as curvas referentes às duas diferentes condições iniciais considerando os dois valores de ρ . Também são mostradas as curvas correspondentes a cenários nos quais não houvesse nenhuma medida de isolamento social. Pode-se notar que os dados referentes ao período de 25/03 a 29/03 são plausivelmente ajustados pelas curvas de $\rho = 0.35$ e $\rho = 0.45$ sem a mudança nas condições iniciais. Com a mudança nas condições iniciais, as novas curvas passam a ajustar precisamente o ponto correspondente ao dia 23/03, constituindo limitantes superiores para todo o conjunto de dados pelo menos até o dia 29/03. Os dados, portanto, parecem afastar a hipótese de que a epidemia venha a se desenrolar da forma como o faria se não houvesse a adoção de nenhuma medida de isolamento social. Um

conjunto de medidas adotadas espontaneamente pela população aparenta já ter causado algum efeito na trajetória do número de casos reportados.

As figuras 3 e 4 mostram projeções da evolução do número de casos confirmados da doença e do número de leitos de internação necessários, ao longo dos próximos meses, supondo que a taxa de transmissão se mantenha reduzida por fatores que variam entre $\rho = 0.35$ e $\rho = 0.45$.

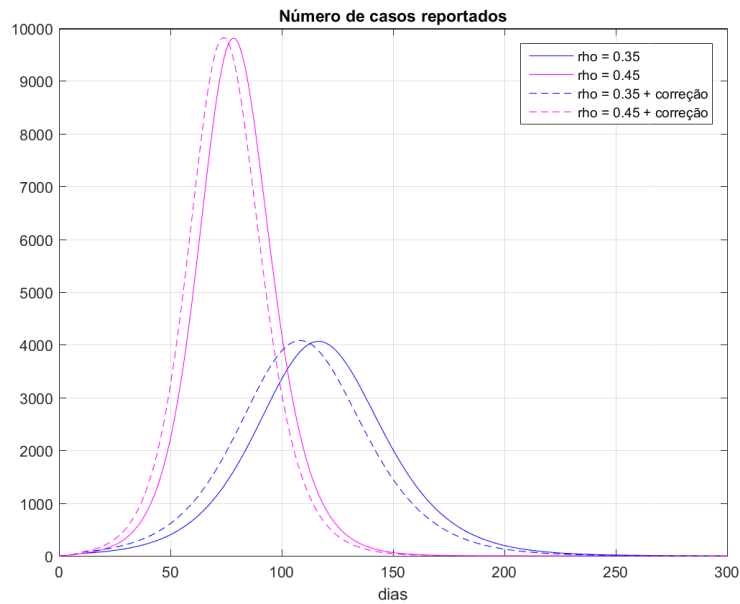


Figura 3: Cenários da evolução do número de casos reportados da COVID-19 em Belo Horizonte. As simulações de cenários consideram valores de $\beta = 0.35$ (linhas azuis) e $\beta = 0.45$ (linhas magenta). As linhas tracejadas são obtidas quando as condições iniciais da simulação são alteradas para ajustar o número de casos do dia 24/03.

Nota-se que a hipótese de que haja acúmulo de testes com liberações pontuais de grandes lotes não chega a afetar o formato das curvas, produzindo apenas um atraso na sequência de eventos previstos. Deve-se ressaltar que, para que tal conclusão prevaleça, há uma premissa relativamente forte que deve ser pelo menos aproximadamente verdadeira: os dados divulgados diariamente deveriam representar uma proporção constante do total diário de casos (ou seja, de cada 100 exames, por exemplo 20 seguem uma tramitação normal, e 80 ficam retidos por um tempo maior, sendo que a liberação de todos os exames retidos ao longo de vários dias ocorre concentrada em alguns poucos dias).

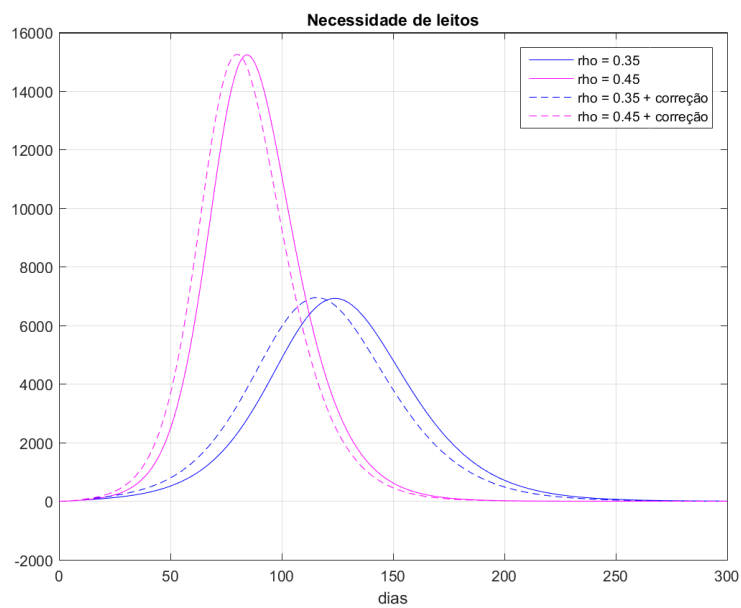


Figura 4: Cenários da evolução da necessidade de leitos hospitalares para pacientes que contraíram a COVID-19 em Belo Horizonte. As simulações de cenários consideram valores de $\beta = 0.35$ (linhas azuis) e $\beta = 0.45$ (linhas magenta). As linhas tracejadas são obtidas quando as condições iniciais da simulação são alteradas para ajustar o número de casos do dia 24/03.

Com a série de dados disponível, não é possível produzir estimativas mais precisas da taxa de transmissão β que estaria em efeito no período de 12/03 a 22/03, e que seria refletida no número de casos confirmados no período de 24/03 a 03/04. Mesmo a faixa de valores determinada pelos procedimentos acima descritos ainda encontra-se sujeita a grandes incertezas, principalmente relacionadas com a verdadeira relação entre o número de casos confirmados e o número de casos efetivamente ocorrendo, no contexto da atual capacidade instalada em Minas Gerais para a realização de testes de diagnóstico da COVID-19.

Ressalvadas essas limitações, a análise das projeções para o avanço da epidemia sugere que haveria a necessidade simultânea de pelo menos 6.000 leitos hospitalares para tratamento dos casos mais graves da COVID-19, no melhor cenário, chegando a até 15.000 leitos, em um cenário mais desfavorável, em algum momento entre meados de maio e meados de julho. Tal análise sugere que as medidas adotadas espontaneamente pela população não seriam suficientes para evitar uma situação de intensa sobrecarga do sistema de saúde, sendo necessária a adoção de medidas pelo poder público. Dentro de cerca de uma semana deverá ser possível a realização de análises preliminares do efeito das medidas adotadas em Belo Horizonte a partir de 22/03.

3 Determinação do fator de redução da taxa de transmissão - Abordagem 2

A segunda abordagem desenvolvida para tratar o problema de estimar a variação da taxa de transmissão da COVID-19 ao longo do tempo utiliza uma abordagem bayesiana, baseada em um algoritmo do tipo MCMC (Markov-Chain Monte Carlo), para produzir estimativas com os respectivos intervalos de confiança. Essa abordagem foi proposta na referência [Thompson, 2019] e encontra-se descrita no Anexo “Estimativas de R_0 para Belo Horizonte e Minas Gerais”.

Uma vez determinadas as estimativas para $R(t)$, o valor da taxa de transmissão β é obtido pela expressão:

$$\beta(t) = \frac{R(t)}{D}$$

onde D representa o tempo médio do estágio infeccioso de uma pessoa infectada pelo vírus da COVID-19. Deve-se notar que essa aproximação é válida apenas nos estágios iniciais do avanço da epidemia, como é o caso agora. Uma vez determinada a trajetória de $\beta(t)$, com o correspondente intervalo de confiança, realiza-se então um conjunto de simulações de cenários considerando os valores de taxas de transmissão obtidos na mediana e nos quantis de 5% e 95% de variabilidade na estimação do índice de reprodução $R(t)$. Para a realização de projeções, o último valor de $\beta(t)$ encontrado sobre a série de dados observada é mantido constante ao longo de todo o tempo futuro.

A Figura 5 mostra o ajuste dos cenários assim produzidos aos dados da evolução da epidemia em Belo Horizonte.

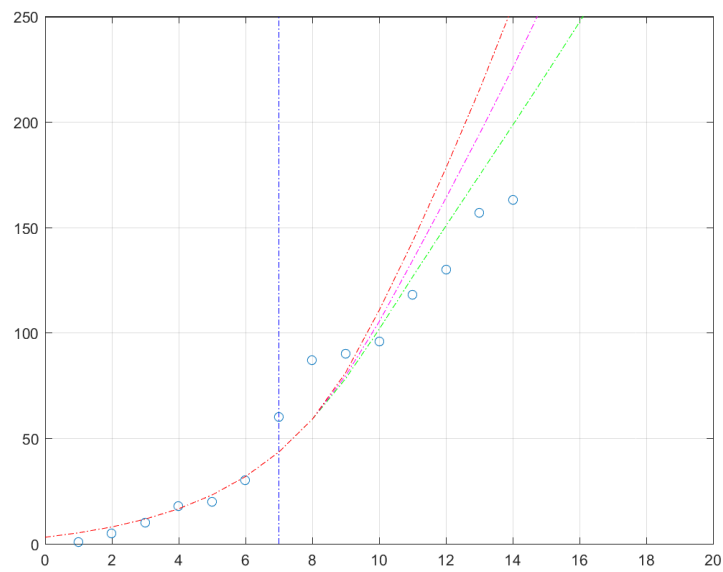


Figura 5: Superposição da curva do número acumulado de casos reportados previstos pelo modelo ajustado com os pontos correspondentes aos valores acumulados do número de casos confirmados. A partir do dia 22/03, são mostradas projeções considerando os percentis 0.05 (linha azul), 0.5 (linha magenta) e 0.95 (linha verde). O tempo $t = 0$ corresponde à data de 15/03.

Os resultados das simulações de cenários para a projeção do número de infectados e da necessidade de leitos hospitalares são apresentados nas figuras 6 e 7.

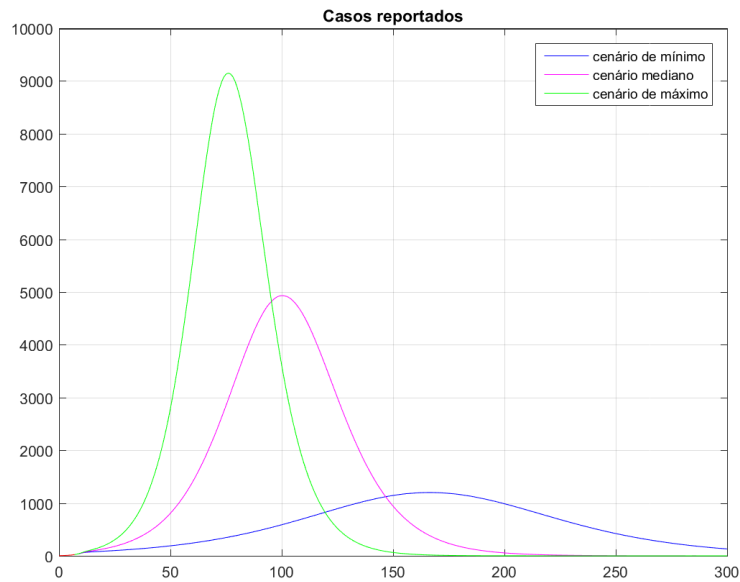


Figura 6: Cenários da evolução do número de casos reportados da COVID-19 em Belo Horizonte. As simulações de cenários consideram os percentis 0.05 (linha azul), 0.5 (linha magenta) e 0.95 (linha verde).

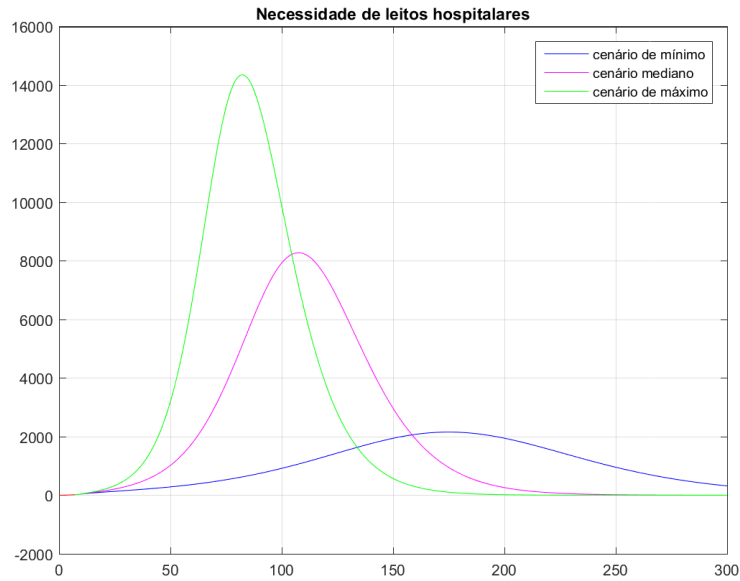


Figura 7: Cenários da evolução da necessidade de leitos hospitalares para pacientes que contraíram a COVID-19 em Belo Horizonte. As simulações de cenários consideram os percentis 0.05 (linha azul), 0.5 (linha magenta) e 0.95 (linha verde).

De maneira geral, as simulações realizadas utilizando esta segunda abordagem concordam, em grande medida, com os resultados das simulações feitas de acordo com a primeira abordagem. Se a primeira abordagem prevê, por exemplo, picos de necessidade de leitos hospitalares que variam entre 7000 e 15000 vagas necessárias, a segunda abordagem situa a mediana e o percentil 0.95 indicando necessidades de pico da ordem de 8000 e 14000 vagas. Apenas o cenário situado no percentil 0.05 (ou seja, entre os 5% mais favoráveis) prevê uma necessidade de leitos da ordem de 2000 vagas no momento de pico.

Deve-se notar que tais metodologias para a estimação da taxa de transmissão observada após o início das medidas de isolamento social utilizam procedimentos bastante distintos para a avaliação da incerteza intrínseca aos dados. Isto sugere que a avaliação de cenários aqui apresentada esteja em razoável acordo com os dados. Como indicado no preâmbulo deste Relatório, a aderência efetiva dos cenários estudados à realidade depende, essencialmente, de um fator adicional de incerteza que se encontra relacionado com o registro tempestivo dos casos da doença.

Apêndice

Modelo

Neste trabalho utilizamos um modelo compartimental determinístico do tipo SEIR (Susceptível-Exposto-Infetado-Removido). A formulação específica adotada neste relatório corresponde essencialmente à formulação já adotada na confecção do Relatório de 24/03, com a introdução de pequenos aperfeiçoamentos conforme descrição apresentada a seguir.

No modelo SEIR aqui adotado, a população de uma cidade é particionada nos compartimentos:

- Susceptíveis (S): indivíduos que não tiveram ainda contato com o vírus tendo, portanto, susceptibilidade a contrair a doença.
- Expostos (E): indivíduos que contraíram o vírus e que se encontram ainda na fase de incubação da doença, sem manifestação de qualquer sintoma.
- Infetados reportados (I^r): indivíduos que contraíram o vírus e apresentam sintomas, tendo recorrido ao sistema de saúde. Esses indivíduos são contabilizados como “casos confirmados” da doença, nos boletins oficiais.
- Infetados não-reportados (I^n): indivíduos que contraíram o vírus e apresentam sintomas leves, ou até mesmo permanecem assintomáticos, não tendo recorrido ao sistema de saúde. Esses indivíduos não são contabilizados nos boletins oficiais, mas exercem importante papel na propagação do vírus.

Além dessas variáveis representativas dos compartimentos, a simulação aqui descrita requer mais duas variáveis:

- Soma cumulativa dos infetados reportados (C^r): representa a soma, em um dado instante, do número de casos reportados até aquele momento.
- Pacientes hospitalizados (H): número de pacientes que se encontram em internação hospitalar em decorrência da Covid-19, em cada instante.

O modelo é descrito pelo sistema de equações diferenciais:

$$\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= -\beta \frac{SI^r}{N} - \mu\beta \frac{SI^n}{N} \\
\frac{dE}{dt} &= \beta \frac{SI^r}{N} + \mu\beta \frac{SI^n}{N} - \frac{E}{Z} \\
\frac{dI^r}{dt} &= \alpha \frac{E}{Z} - \frac{I^r}{D^r} \\
\frac{dI^n}{dt} &= (1 - \alpha) \frac{E}{Z} - \frac{I^n}{D^n}
\end{aligned} \tag{1}$$

Os seguintes parâmetros são utilizados nesse modelo:

- β : Taxa de transmissão. Essa taxa depende de fatores locais, não sendo um parâmetro universalmente aplicável. Em [Li, 2020] foi encontrado um valor de $\beta = 1.12$. Fazendo entretanto o ajuste pela técnica de mínimos quadrados (como será explicado adiante), foi encontrado um valor de $\beta = 1.226$ para o Brasil, que foi inicialmente utilizado nas simulações descritas no Relatório de 24/03. Com a incorporação de mais alguns pontos à série de dados, foi obtido um novo valor de $\beta = 1.280$, que passou a ser utilizado nos experimentos descritos no presente Relatório.
- α : Proporção de infectados que serão registrados como casos reportados. O principal achado do artigo [Li, 2020] foi a estimativa de que o valor para tal parâmetro seria de $\alpha = 0.14$ em Wuhan. No caso dos dados do Brasil, a estimativa por mínimos quadrados conduziu ao valor de $\alpha = 0.049$ que foi utilizado nas simulações descritas no Relatório de 24/03. Uma nova estimativa, considerando uma série de dados mais extensa, levou ao valor $\alpha = 0.0431$ que foi empregado no presente Relatório.
- μ : Fator redutor para a taxa de transmissão dos infectados não-reportados. Esse fator existe porque, no caso de infectados assintomáticos, haverá menor probabilidade de transmissão, uma vez que haverá menor espalhamento de secreções no ambiente. Em [Li, 2020] esse fator foi estimado em $\mu = 0.55$. No caso brasileiro, o grande índice de casos não-notificados torna mais indistinguíveis as características dos dois grupos. Com a técnica de mínimos quadrados, foi encontrado um valor de $\mu = 1$, que foi utilizado aqui. Tal valor não foi alterado na nova estimativa de parâmetros realizada.
- Z : Período médio de incubação. A referência [Li, 2020] utilizou $Z = 3.69$ dias. Esse valor é utilizado aqui.
- D^r e D^n : Duração média do período infeccioso, respectivamente para os casos reportados e para os casos não-reportados. Em [Li, 2020]

foram empregados $D^r = D^n = 3.48$ dias. Esses valores foram empregados aqui.

- N : População sob risco. No caso da população da cidade de Belo Horizonte, foi empregado aqui $N = 2524000$.

Deve-se notar que Z , D^r e D^n são parâmetros essencialmente biológicos, relacionados à interação entre os vírus e o hospedeiro humano. É de se esperar que não haja expressiva variação de seus valores em diferentes localidades. Por outro lado, os valores de β , α e μ são claramente dependentes de fatores locais. A taxa de transmissão β depende tanto de características específicas do vírus quanto das características de interação entre os indivíduos da população. Já o índice de notificação de casos, α , depende fortemente da organização do sistema de saúde local. Por fim, o fator redutor da taxa de transmissão para os casos não-notificados, μ , depende da proporção de casos com sintomas mais fortes que não são notificados, dependendo portanto de α . Por esse motivo, ao invés de se replicarem valores utilizados em outros estudos, que são referentes em sua maior parte à China, foram empregados valores provenientes de ajustes do modelo aos dados do Brasil.

O compartimento R não aparece explicitamente representado nas equações diferenciais porque pode ser resolvido algebricamente:

$$R(t) = N - (S(t) + E(t) + I^r(t) + I^s(t)) \quad (2)$$

As seguintes equações auxiliares são acrescentadas às equações (1) para formar o modelo a ser simulado:

$$\begin{aligned} \frac{dC^r}{dt} &= \alpha \frac{E}{Z} \\ \frac{dH}{dt} &= -\frac{H}{\gamma} + \sigma \alpha \frac{E}{Z} \end{aligned} \quad (3)$$

A variável $H(t)$ significa uma projeção do número de leitos hospitalares necessários, ao longo do tempo, para atender a demanda causada pela Covid-19. Deve-se notar uma mudança no primeiro termo da equação diferencial que descreve a derivada de $H(t)$, em relação à formulação utilizada no Relatório 1. Essa nova formulação produz uma aproximação mais precisa da variável $H(t)$ que irá resultar em estimativas um pouco menores do número de leitos hospitalares que serão necessários.

A variável C^r significa o número acumulado de casos reportados, a cada instante de tempo.

Dois parâmetros adicionais estão presentes nessas equações:

- σ : Proporção do número de infectados reportados que requerem hospitalização. Assume-se que todos os pacientes que requerem hospitalização se encontram entre os casos reportados. Para se escolher um valor

Tabela 2: Número acumulado de casos confirmados da Covid-19 no Brasil, indicados por C^r . O dia 0 corresponde à data de 05/03/2020.

dia	C^r
0	8
1	13
2	19
3	25
4	30
5	35
6	69
7	109
8	120
9	147
10	231
11	301
12	364
13	535
14	698

para este parâmetro, foi feita a seguinte avaliação: em Wuhan, cerca de 14% do total de casos eram reportados [Li, 2020] e, desses, de 15% a 20% necessitavam de internação. Assumindo que a mesma proporção do total de casos necessite de internação no caso brasileiro, haverá de 42% a 56% do total de casos reportados requerendo internação. Foi então assumido o valor $\sigma = 0.5$.

- γ : Período médio de duração da internação hospitalar. Foi adotado o valor $\gamma = 12.8$ dias, que foi reportado em [Guan, 2020]. Embora seja de se esperar que haja alguma especificidade local nesse parâmetro, não se encontram disponíveis estatísticas capazes de subsidiar a escolha de valores mais ajustados ao caso do Brasil.

Ajuste de Parâmetros

Para realizar o ajuste dos parâmetros do modelo, foi utilizada a série de casos confirmados da Covid-19 em todo o território brasileiro, a partir do dia em que foi notificado o oitavo caso confirmado. Essa série é mostrada na Tabela 2.

Para o ajuste dos parâmetros do modelo, foi feita a simulação do sistema de equações (excetuando a equação do número de casos requerendo internação) com o seguinte conjunto de parâmetros assumindo valores prefixados:

- $Z = 3.69$

- $D^r = D^n = 3.48$
- $N = 210000000$

Os parâmetros α , β e μ foram estimados por meio do problema de otimizaçãõ definido pela expressão (4).

$$\begin{aligned}
 & (\alpha^*, \beta^*, \mu^*, k_e^*) = \arg \min J(\alpha, \beta, \mu, k_e) \\
 & \text{sujeito a: } \begin{cases} \alpha, \beta, \mu, k_e > 0 \\ \mu \leq 1 \\ \text{sistema (1)} \\ I^r(0) = 8; \quad E(0) = k_e I^r(0); \quad I^n(0) = \frac{1-\alpha}{\alpha} I^r(0) \\ N = 210000000 \end{cases} \quad (4)
 \end{aligned}$$

Deve-se notar que, embora os dados da série histórica de infectados sejam os mesmos utilizados no Relatório de 24/03, o tratamento dado às condições iniciais do sistema de equações no presente Relatório é um pouco diferente. Desta vez:

- A escolha do valor inicial $I^n(0)$ é feita de maneira a satisfazer a fórmula algébrica que relaciona I^n com I^r ;
- O valor inicial $E(0)$ é tratado agora como uma variável de decisão do problema de otimização.

Como função objetivo foi empregada a seguinte função quadrática:

$$J(\alpha, \beta, \mu, k_e) = \sum_{k=0}^{14} \left[C^r(k) - \int_0^k \alpha \frac{E(t)}{Z} dt \right]^2 \quad (5)$$

Foram obtidos os seguintes valores para as estimativas dos parâmetros:

- $\alpha^* = 0.0635$
- $\beta^* = 1.1808$
- $\mu^* = 1.0$
- $k_e^* = 19.8972$

Em virtude da modificação introduzida no tratamento das condições iniciais, foram obtidos valores um pouco diferentes daqueles indicados no Relatório 1. Deve-se notar que a restrição $\mu \leq 1$ ficou novamente ativa no ponto de ótimo do problema de estimação. A Figura 8 mostra a curva do ajuste obtido.

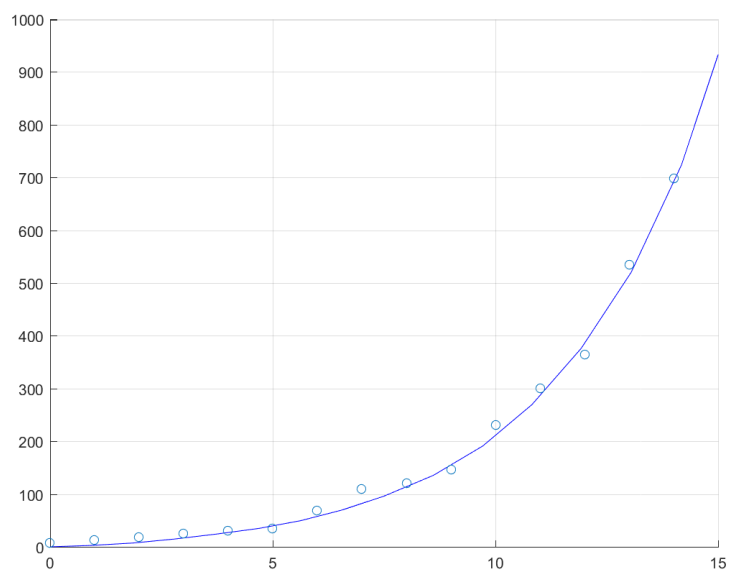


Figura 8: Superposição da curva do número acumulado de casos reportados no Brasil, previstos pelo modelo ajustado, com os pontos correspondentes aos valores acumulados do número de casos confirmados no país.

Referências

- [Guan, 2020] Guan, W. (2020). Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. *New England Journal of Medicine*.
- [Li, 2020] Li, R. (2020). Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2). *Science*.
- [Thompson, 2019] Thompson, R. N. (2019). Improved inference of time-varying reproduction numbers during infectious disease outbreaks. *Epidemics*.