

NOTA TÉCNICA

COVID-19: Um novo modelo SEIR para países em desenvolvimento – estudo de caso para a Região Metropolitana de Belém

Elaborada por:

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês – PPGEE/UFPA

- rfrances@ufpa.br
- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7458287841862567>

Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva – PPGEE/UFPA

- marcelino@ufpa.br
- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7080513172499497>

Prof. Dr. André Carlos Ponce de Leon Ferreira de Carvalho – ICMC/USP

- andre@icmc.usp.br
- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9674541381385819>

Prof. Dr. Solon Venâncio Carvalho - INPE

- solon@lac.inpe.br
- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3368137994024629>

Prof. Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar – Unifesp

- vijay.nl@inpe.br
- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9922863822347014>

Profa. MS. e doutoranda Evelin Helena Silva Cardoso – UFRA – PPGEE/UFPA

- evelinhelena@ufpa.br
- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5388902706205997>

Doutorando Frederico Guilherme Santana Da Silva Filho – PPGEE/UFPA

- fredericof@ufpa.br
- CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9059944274995039>

Belém-PA, abril de 2020.

1. Introdução

No final do ano de 2019, uma pneumonia de causa desconhecida foi detectada na província de Wuhan (China) e relatada pela primeira vez à Organização Mundial de Saúde (OMS) no dia 31 de dezembro de 2019. O que começou como uma doença misteriosa, foi referida primeiramente como 2019-nCoV, doença causada pelo novo coronavírus (Sars-Cov-2) e se tornou mundialmente conhecida como COVID-19. Apenas um mês depois (30 de janeiro de 2020), a OMS declarou que o surto da doença constituía uma Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional – o mais alto nível de alerta da Organização e, em 11 de março de 2020, a COVID-19 foi caracterizada oficialmente como uma pandemia [1].

Desde então, o mundo enfrenta uma emergência de saúde pública, com poder devastador ainda não experimentado em um passado recente. O novo coronavírus é uma doença respiratória aguda e, por vezes, grave, podendo levar o infectado a óbito. A transmissão interpessoal ocorre pelo contato com secreções contaminadas, principalmente pelo contato com grandes gotículas respiratórias, mas também pode ocorrer por meio do contato com uma superfície contaminada [1]. Seu alto poder de espalhamento requer uma atenção especial das autoridades internacionais, devido ao seu efeito nos sistemas de saúde, sobrecarregando os mesmos, podendo levá-los ao colapso. Desta forma, é fundamental o desenvolvimento de ferramentas apoio à tomada de decisão, como modelos matemáticos e de inteligência artificial, para auxiliar as autoridades a concentrarem seus esforços nos fatores mais relevantes, no afã de atenuar a curva epidêmica da doença e evitar ou minimizar a implosão dos sistemas de saúde.

Na ausência de intervenções farmacológicas, como medicamentos amplamente aceitos ou o uso de vacinas, as chamadas Intervenções Não Farmacêuticas (NPIs, *non-pharmaceutical interventions*) são importantíssimas para influenciar a trajetória da epidemia nos países. Atualmente, a principal recomendação da OMS é o isolamento social [2]. Assim, os doentes são postos em quarentena hospitalar/domiciliar e a população como um todo é orientada a realizar quarentena voluntária domiciliar, quando possível, a fim de diminuir a escalada da propagação da doença, amenizando o impacto da pandemia no sistema de saúde. Além disso, o uso de máscaras e a higienização frequente das mãos com água e sabão e/ou por meio do uso de álcool em gel têm sido apontados como grandes aliados no combate à COVID-19.

Com o objetivo de avaliar as possíveis dimensões da pandemia em termos de contaminados, hospitalizados graves e mortos, assim como os efeitos das medidas NPIs – sucintamente definida como a redução do número médio de contatos diários entre pessoas e a melhor higienização das mãos e objetos, além do uso de máscaras e luvas, pesquisadores e especialistas no tema fazem uso de modelos matemáticos que representam a dinâmica de epidemias ao longo do tempo, como por exemplo: modelos SIR (Suscetível, Infecioso, Recuperado) e SEIR (Suscetível, Exposto, Infecioso, Recuperado) [3].

Recentemente, um dos estudos mais relevantes foi elaborado pelo grupo liderado por Patrick G. T. Walker, do Imperial College London na Inglaterra [6], que utilizou um modelo SEIR estruturado por idades. Em tal trabalho, os autores consideraram aspectos tanto da pirâmide populacional dos países, quanto dos contatos médios entre pessoas no mesmo grupo e em grupos de faixa etária distintos, para realizar previsões de número de infectados e os efeitos das medidas NPIs durante a pandemia de COVID-19.

Embora de extrema relevância, o trabalho anteriormente mencionado não insere características típicas de países em desenvolvimento, os quais apresentam um elevado grau de desigualdade social (ex.: Brasil e Índia) que tendem a agravar os efeitos da pandemia. Além de melhor aderir às realidades de tais países, a elaboração de modelos que tratam os aspectos da desigualdade social, como condições precárias de moradia, falta de saneamento básico, baixo nível de acesso a serviços de saúde, permitem que os governos elaborem planos de ação diferenciados e mais efetivos.

No mesmo diapasão, neste estudo, utilizamos o tradicional modelo SEIR como base para elaboração de um novo modelo, no qual é possível inserir as características socioeconômicas de países (ou regiões) com elevado grau de desigualdade social. Tal modelo, neste trabalho, é utilizado para avaliar e fornecer informações acerca da expansão do surto da COVID-19 em diversas regiões metropolitanas do Brasil, utilizando como base de dados aquelas providas pelos governos federal, estaduais ou municipais, tais como PNAD (Pesquisa Nacional de Amostra de Domicílios) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), DATASUS do Ministério da Saúde e casos confirmados de COVID-19 relatados pelas Secretarias Estaduais de Saúde.

Os resultados obtidos são utilizados para se analisar o impacto que o surto da COVID-19 pode gerar no sistema de saúde da região sob análise. Além das estimativas, o estudo prevê a eficácia de diversas estratégias, com diferentes medidas de intervenção não farmacêuticas. Isto, sem dúvida, pode contribuir para a melhor atuação do poder público na gestão desta crise sem paralelo na história recente da humanidade.

Modelos da mesma natureza são as ferramentas mais acessíveis e mais utilizadas internacionalmente no auxílio à avaliação do impacto de medidas (dos governos) que possam ajudar a reduzir a propagação do vírus com base nas especificidades da realidade de cada local.

2. Metodologia

2.1 Modelo SEIR clássico

O modelo SEIR é um refinamento do modelo SIR (Suscetível, Infectado, Recuperado), que basicamente considera uma taxa de infecção (β) e uma taxa de recuperação (γ) [3]. O refinamento do modelo SIR se dá na introdução de um período latente ao modelo (σ). Durante este estágio, a abundância de patógenos é muito baixa para a transmissão ativa a indivíduos suscetíveis. Em outras palavras, o modelo considera que há um período após a infecção no qual o indivíduo infectado ainda não é infeccioso. Indivíduos neste estado são chamados de Expostos. O modelo SEIR clássico, sem considerar nascimento e morte dos indivíduos, busca resolver o sistema de equações diferenciais ordinárias a seguir:

$$\begin{aligned}\frac{dS(t)}{dt} &= \frac{-\beta S(t)I(t)}{N} \\ \frac{dE(t)}{dt} &= \frac{-\beta S(t)I(t)}{N} - \sigma E(t)\end{aligned}$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \sigma E(t) - \gamma I(t)$$
$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t)$$

As equações denotam no tempo t o respectivo número de casos/indivíduos suscetíveis, expostos, infecciosos e recuperados, este último resume todos aqueles que foram removidos por se tornarem imunes após a recuperação ou que vieram a óbito em decorrência da doença. A constante $N = S + E + I + R$, denota a população total da região investigada.

2.2 Um novo modelo epidêmico SEIR para regiões e países em desenvolvimento

Países em desenvolvimento são considerados um subgrupo de países subdesenvolvidos. Em geral, apresentam níveis medianos de desenvolvimento, parque industrial relativamente dinâmico, uma boa capacidade de exportações e certo dinamismo econômico. São, por isso, também chamados de *países emergentes*, cujos exemplos englobam, entre outros, Brasil, China, México, Índia, Cingapura e Coreia do Sul. Muitos desses países são subdesenvolvidos devido a fatores históricos decorrentes da colonização e ainda apresentam graves problemas no que tange à desigualdade social, resultado da má distribuição de renda, baixos índices de escolaridade, problemas de moradia (moradias superlotadas e sem condições sanitárias), desnutrição, alto índice de desemprego e sérios problemas de infraestrutura de serviços básicos, tais como pavimentação, esgoto e água tratada.

Nesse contexto, a crise da COVID-19 nestes países promete ser ainda mais devastadora, seja devido aos graves problemas de moradia (domicílios em situação precária, casas superpopuladas e de poucos cômodos), que não contribuem para o isolamento efetivo da população (infectados ou não); seja por problemas sanitários (saneamento básico, acesso à água tratada), que dificultam/inviabilizam o cumprimento de recomendações, tais como a higienização frequente das mãos com água e sabão. Portanto, a adesão às principais recomendações das autoridades de saúde hoje não está ao alcance de todos os brasileiros (e de países em situação semelhante), a despeito dos esforços que a imprensa e os poderes têm envidado em grandes campanhas de esclarecimentos. Ao contrário, podem agravar o espalhamento da doença e seus efeitos podem levar ao rápido colapso do sistema de saúde.

Diante deste contexto/cenário, apresentamos um novo modelo epidêmico mais realista adaptado do SEIR para países em desenvolvimento. Para isto, incluímos no modelo SEIR um fator que considera que pessoas infectadas, mesmo em quarentena, continuarão a infectar demais indivíduos. Tal fator sumariza os efeitos da falta de saneamento básico, acesso a água potável e alta densidade de moradores por cômodo dos domicílios da região em estudo.

Nosso objetivo é oferecer a países em desenvolvimento, como o Brasil, um modelo capaz de prever de maneira mais realista o espalhamento do novo coronavírus nas cidades e o impacto do mesmo no sistema de saúde, proporcionando maior base para as prementes tomadas de decisão, a fim de criar mecanismos para as ações necessárias e uma resposta adequada à sua população.

2.2.1 Definições e pressupostos para o modelo

Dadas as dimensões de número de contaminados pelo COVID-19, o que na prática indica que o sistema de saúde não possui capacidade de fornecer isolamento para todos os contaminados. Assim, para os casos de pessoas contaminadas que não estão em estado grave, é recomendada a quarentena domiciliar. Porém, as pessoas em situação de moradia precária e elevado número demorados por cômodo não conseguem efetivamente realizar o isolamento domiciliar.

Em geral estas pessoas moram em áreas em que os demais domicílios possuem condições semelhantes e que, desta forma, as medidas para a redução da taxa de contágio nesta população, mesmo para os indivíduos com confirmação da contaminação ou para momentos de suspensão das atividades laborais, não serão efetivas.

Além disso, tais pessoas, em geral, realizam atividades como de frentistas, motoristas e garçons, e, desta forma, podem contaminar e ser contaminadas por pessoas em condições saudáveis de moradia.

Com base nestas observações e em algumas outras, para a elaboração e a devida interpretação do modelo, os seguintes pressupostos são assumidos:

- Uma proporção da população não conseguirá reduzir sua taxa de contágio;
- Os trabalhadores combatendo a pandemia (médicos, policias, bombeiros, etc) estão devidamente protegidos para não propagarem o contágio;
- Existe um tempo de incubação entre o indivíduo ser infectado e se tornar infeccioso.

2.2.2 O novo modelo SEIR

Diferente do SEIR clássico, o nosso modelo distingue o compartimento/estado Infeccioso em dois compartimentos, de acordo com a probabilidade do indivíduo infeccioso poder efetivamente reduzir ou não sua taxa de contágio.

Assim, o compartimento I do modelo clássico foi substituído por dois novos compartimentos: I_a (indivíduos infecciosos que conseguem reduzir sua taxa de contaminação, β_a , de acordo com as restrições orientadas pelos agentes de saúde) e I_b (indivíduos infecciosos que não conseguem efetivamente reduzirem sua taxa de contaminação, β_b). O novo modelo SEIR busca resolver o sistema de equações diferenciais ordinárias abaixo:

$$\begin{aligned}\frac{dS(t)}{dt} &= \frac{-S(t)\beta_a I_a(t) - S(t)\beta_b I_b(t)}{N} \\ \frac{dE(t)}{dt} &= \frac{S(t)\beta_a I_a(t) + S(t)\beta_b I_b(t)}{N} - \alpha E(t) \\ \frac{dI_a(t)}{dt} &= \delta \alpha E(t) - \gamma I_a(t) \\ \frac{dI_b(t)}{dt} &= (1 - \delta) \alpha E(t) - \gamma I_b(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \gamma I_a(t) + \gamma I_b(t)\end{aligned}$$

Onde

- N é a população inicial suscetível;
- δ é a proporção de N que não consegue efetivamente reduzir sua taxa de contágio de acordo com as orientações dos agentes de saúde;
- α é a taxa de mudança de Exposto (indivíduos infectados ainda não infecciosos) para Infeccioso;
- β_a é a taxa de contaminação para indivíduos do grupo a ;
- β_b é a taxa de contaminação para indivíduos do grupo b ;
- γ é a taxa de saída de indivíduos da condição de infecciosos, seja por recuperação ou por morte;
- $S(t)$ é o número de indivíduos suscetíveis ao contágio ao longo do tempo;
- $E(t)$ é o número de indivíduos expostos ao longo do tempo;
- $I_a(t)$ é o número de indivíduos infecciosos no grupo a ao longo do tempo;
- $I_b(t)$ é o número de indivíduos infecciosos no grupo b ao longo do tempo;
- $R(t)$ é o número de indivíduos que finalizaram o ciclo do COVID-19, por recuperação ou por morte, ao longo do tempo.

O número de mortes ao longo do tempo é calculado com uma fração de $R(t)$, de acordo com os relatórios de taxa de letalidade da visualizados nos países que já estão em estágio mais avançado da pandemia.

O número de leitos de UTI necessários é calculado como uma fração do valor de pico do número total de Infecciosos Ativos ao longo do tempo, $I(t) = I_a(t) + I_b(t)$, de acordo com os relatórios de taxa de letalidade da visualizados nos países que já estão em estágio mais avançado da pandemia.

3. Estudo de Caso – Aplicação para a Região Metropolitana de Belém, Brasil

3.1 Método para cidades brasileiras

A estimativa do tamanho da população brasileira para os 5.570 municípios do país foi obtida de acordo com os dados mais recentes divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). Demais dados demográficos foram obtidos a partir de informações da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), também realizada pelo IBGE. A PNAD traz informações tais como *educação, acesso às tecnologias de informação e comunicação (TIC), características gerais dos domicílios e dos moradores, ocupação, rendimento médio mensal*, entre outros [4]. Sobre as características gerais dos domicílios e dos moradores, a PNAD realiza o levantamento de informações tais como: *tipo e condição da moradia; material predominante nas paredes, piso e telhado; serviços essenciais de saneamento básico, que abarcam o abastecimento de água, a presença de banheiro e esgotamento sanitário, o destino do lixo, e a disponibilidade de energia elétrica; bem como a posse de bens e serviços, contemplando, por exemplo, a posse de geladeira, máquina de lavar roupa, carro e motocicleta*. Quanto às características gerais dos moradores, os comentários se referem à distribuição da população residente por sexo, grupos de idade, além de cor ou raça.

Informações específicas da doença e de estimativas acerca de hospitalização foram extraídas a partir da análise de dados anteriormente obtidos para a COVID-19, em trabalhos como [1][2][5][6][7][8][9][10].

Os números de casos confirmados, recuperados e mortos foram obtidos por meio dos dados divulgados diariamente pelo Ministério da Saúde do Governo Federal [11] e das Secretárias de Saúde dos estados. Assumimos também que indivíduos que residem em habitações com mais de 3 pessoas por cômodo não são capazes de se isolar efetivamente, no entanto têm sua probabilidade de contato diminuída, denotada pelo parâmetro η , que é a taxa de infecção de indivíduos infecciosos não isolados. Para estimar a demanda por serviços de saúde, usamos taxas de hospitalização (internação e cuidados críticos) obtidas de nossa análise anterior de dados da COVID-19 em outros países, assumindo que níveis semelhantes de necessidade de assistência médica são esperados em outros países. Informações sobre leitos hospitalares e leitos de UTI foram extraídas do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde [12], do DATASUS, que disponibiliza informações a fim de subsidiar análises objetivas da situação sanitária, tomadas de decisão baseadas em evidências e elaboração de programas de ações de saúde.

De posse dos dados, usamos o novo modelo SEIR para países em desenvolvimento a fim de estimar o número de infecções e mortes, além da demanda por assistência médica, em cidades brasileiras e o impacto de NPIs na mitigação dos efeitos do espalhamento da COVID-19.

3.2 Cenário e Resultados

Cenário

Os resultados a seguir foram obtidos para a Região Metropolitana de Belém (RMB). A RMB é formada por 7 cidades do estado do Pará (Ananindeua, Belém, Benevides, Castanhal, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Isabel do Pará), que juntas reúnem uma população em torno de 2.459.321 habitantes, segundo dados do IBGE de 2019. De acordo com o CNES/DATASUS atual (2020), a RMB conta com um total de 4.383 leitos hospitalares, entre leitos clínicos, cirúrgicos e complementares (incluindo UTIs). Portanto, a RMB conta em média com 1,78 leitos para cada mil habitantes, número abaixo da média nacional, que é de 1,95 leitos para mil habitantes, segundo a Federação Brasileira de Hospitais (FBH) e Confederação Nacional de Saúde (CNS) [13], enquanto a média do planeta é de 3,2 leitos para mil habitantes [14]. Dados da PNAD mais recente (2018) foram usados para compor as demais informações demográficas. Os números de casos confirmados, recuperados e mortos associados à RMB foram obtidos por meio dos dados divulgados pelo Ministério da Saúde do Governo Federal [11] e das Secretárias de Saúde Pública do Estado do Pará (SESPA) [15].

Para fins de exemplificação da desigualdade social, a Figura 1 apresenta o mapa do município de Belém, com a respectiva descrição da proporção de domicílios com chefes de família recebendo até $\frac{1}{2}$ salário mínimo.

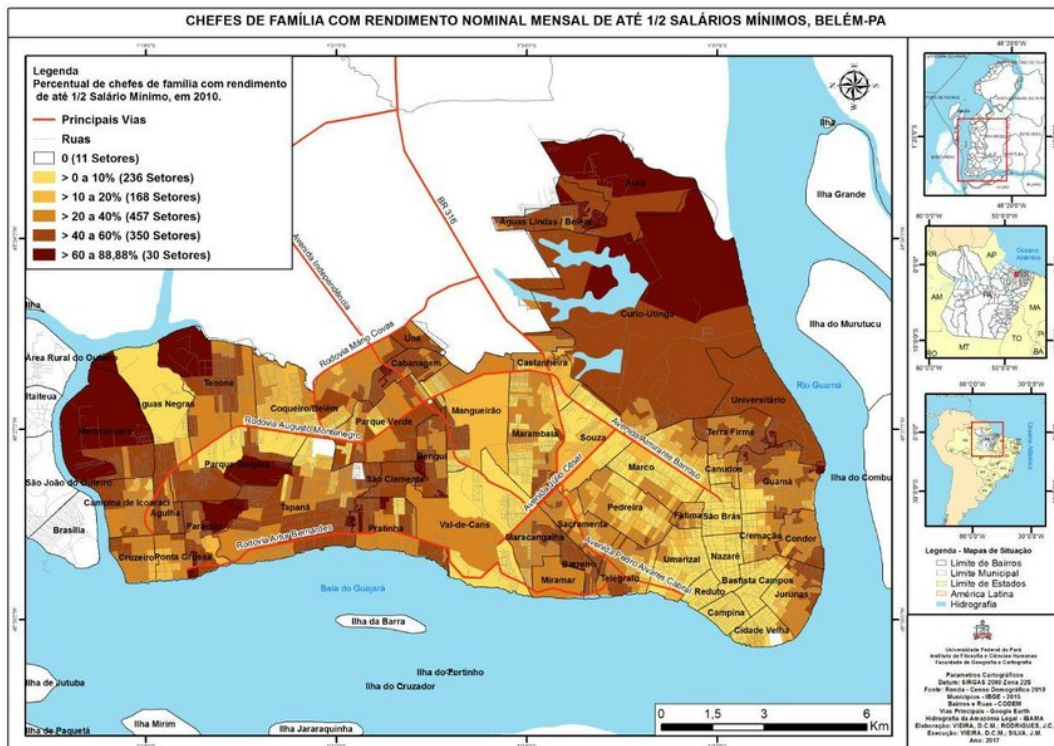


FIGURA1. Chefes de família com rendimento nominal de até ½ salário mínimo.

Fonte: D. C. DE M. VIEIRA, J. C. RODRIGUES, J. C. RODRIGUES, "MAPEAMENTO E ANÁLISE DE DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS: ABORDAGEM INTERPRETATIVA A PARTIR DA CIDADE DE BELÉM, PARÁ", Revista GEOSABERES, 2018.

Os parâmetros de taxas utilizadas no modelo foram obtidos a partir de levantamento bibliográfico acerca da pandemia e os parâmetros de população e proporção de pessoas pertencentes ao grupo *b*, aquelas que não conseguem efetivamente reduzir sua taxa de contaminação, foram obtidos da PNAD Contínua 2018, dados de divulgação anual. A Tabela 1 apresenta os valores utilizados.

TABELA 1. Parâmetros utilizados.

Parâmetro	Valor
N	21.570.239
δ	14,54%
α	1/2 dia ⁻¹
β_a	6,5 x 0,05 x Taxa de Redução de Contágio
β_b	6,5 x 0,05
γ	1/14 dia ⁻¹
Tx UTI	5% dos casos requerem UTI

Resultados e discussão

O número de infectados, demanda de leitos de UTI e mortes ao longo do tempo devido à COVID-19 foram estimados usando o novo modelo SEIR para países em desenvolvimento, a partir da análise de cenários que incluem ou não medidas de NPI por parte do governo. Essas medidas incluem uma política de distanciamento social na

população em geral, a fim de diminuir a transmissão de humano para humano, incluindo a redução de infecções secundárias entre contatos próximos e influenciam nas taxas de contaminação/infecção da população. Dentro do nosso modelo, essa taxa pode ser entendida como um coeficiente que ajusta o β .

Para a Região Metropolitana de Belém, o primeiro caso registrado ocorreu dia 18/03/2020 e, até a data de 12/04/2020, foram registrados um total de 214 confirmações. No próprio dia 18/03/2020, iniciou-se o processo de suspensão de atividades visando à redução da taxa de contágio. Como os resultados têm demorado em média 10 dias para a confirmação, considerou-se que apenas 10 dias após o primeiro caso a suspensão de atividades teve efeito na redução do contágio. Assim, conforme Tabela 1, a taxa de contágio inicial foi estimada como 0,325 ($6,5 \times 0,05$) e após 10 dias inseriu-se uma redução de 20% desta taxa para o grupo a . A Figura 2 apresenta os casos reais versus os casos estimados até o dia 12/04/2020, segundo os parâmetros do modelo.

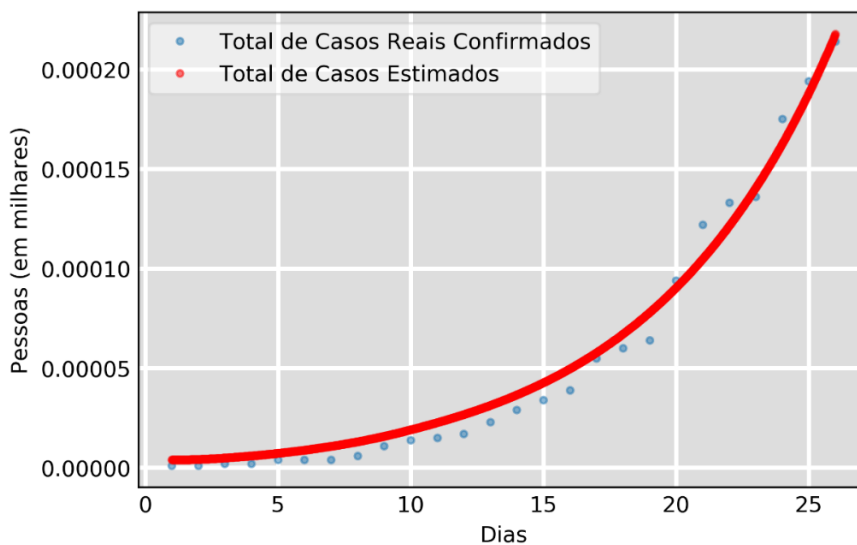


FIGURA 2. Casos reais registrados e simulados.

A partir da calibração da taxa de contágio para obtenção dos resultados da Figura 2, iniciou-se os cálculos considerando cenários onde a redução da taxa de contágio, a partir do 30º dia, foi 20% a 90%, para infecciosos do grupo a , enquanto que para infeccioso do grupo b a taxa de contágio foi mantida constante ao valor inicial. A Figura 3 apresenta o resultado para o caso de 20% de redução de taxa de contágio.

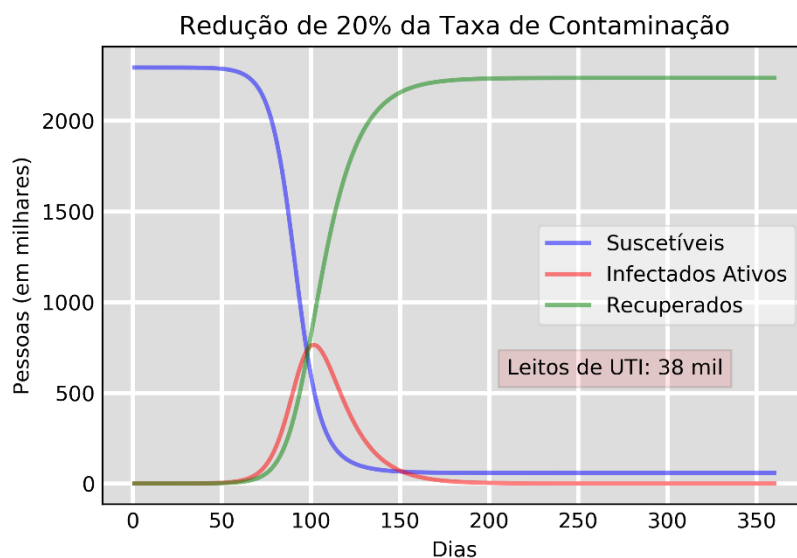


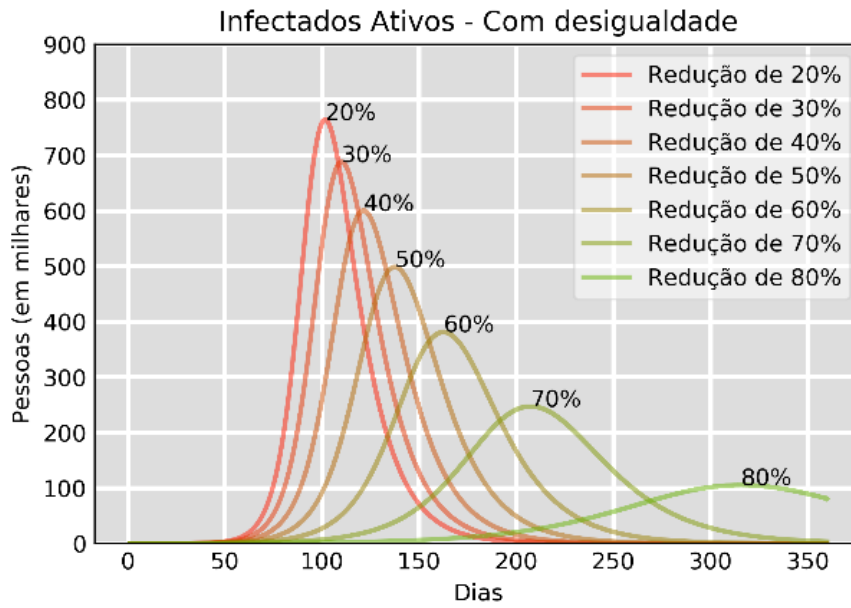
FIGURA 3. Número de casos de COVID-19 caso seja mantido a redução de 20% da taxa de contágio.

As figuras 4 (a) e 4 (b) apresentam as curvas de infectados ativos ao longo do tempo de acordo com a redução da taxa de contágio aplicada a partir do 30º dia. Para fins de comparação do efeito da impossibilidade de todas as pessoas reduzirem sua taxa de contágio, na Figura 4(a), considera-se a situação de 14,54% da população na situação de não reduzir sua taxa de contágio, pelo fato de viverem em domicílio com, no mínimo, 3 pessoas por dormitório e/ou não possuir água potável, enquanto que, na Figura 4(b), considera-se que toda a população tem a capacidade de reduzir sua taxa de contágio.

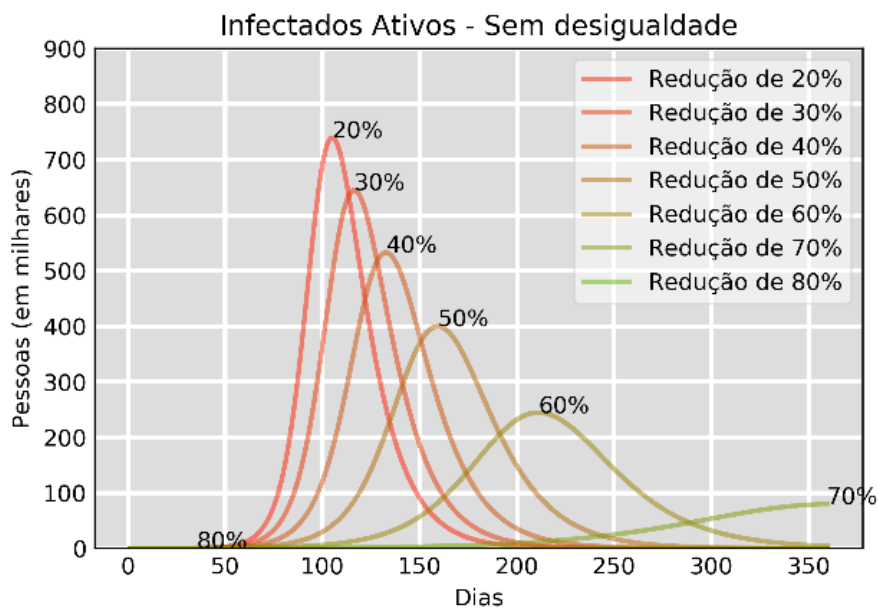
Observa-se que a desigualdade social possui um forte efeito nos resultados, pois enquanto que a redução de 80% da taxa de contágio no caso real (com desigualdade) ainda apresenta um pico de mais de 100 mil infectados ativos por volta do 320º dia, no caso sem desigualdade (normalmente considerado nos estudos disponíveis), a mesma redução praticamente zera a curva de infectado ativos, fazendo com que o valor máximo seja o alcançado nas próximas duas semanas.

Para melhor visualização da diferença de resultados, a Figura 5 apresenta os resultados com e sem desigualdade para 60% da redução da taxa de contágio, Figura 5(a), e para 70% de redução da taxa de contágio, Figura 5(b). Evidencia-se que os resultados são díspares tanto no valor de pico do número de infectados ativos, mais de 100 mil de diferença para 60% de redução e mais de 150 mil de diferença para redução de 70%, quanto no dia em que a curva alcance o pico, aproximadamente 50 dias de diferença para redução de 60% e aproximadamente 150 dias de diferença para redução de 70%.

Ambas as diferenças de valores, valor do pico da curva de infectados ativos e dia de ocorrência do pico, podem induzir gestares públicos a tomar decisões equivocadas sobre quais e em que intensidade as medidas NPI devem ser adotadas.



(a)



(b)

Figura 4. Número de infectados ativos para a Região Metropolitana de Belém – Comparação com desigualdade (a) e sem desigualdade social (b).

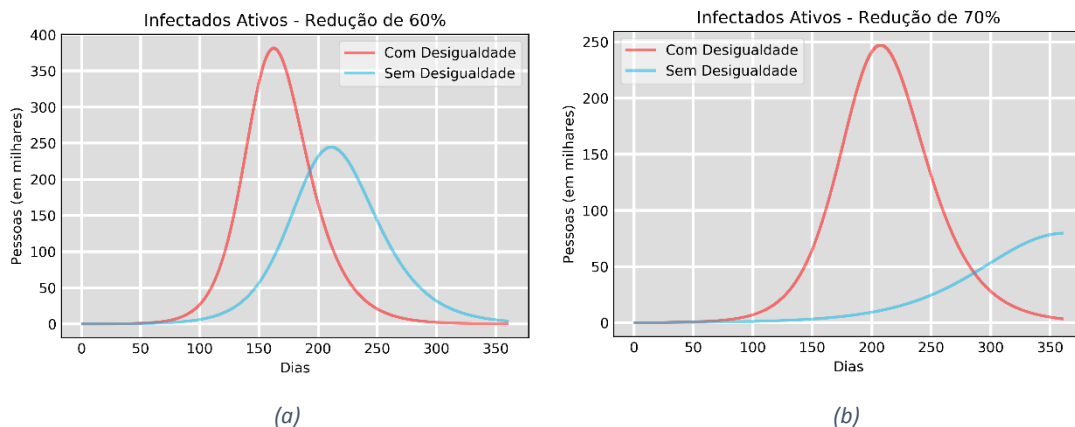


Figura 5. Número de infectados ativos para a Região Metropolitana de Belém – Comparação com e sem desigualdade social para taxas de redução de contágio de 60% (a) e 70% (b).

Em relação à taxa de letalidade da COVID-19, observa-se que há diversas situações distintas que influenciam neste valor, variando desde a pirâmide etária, acesso ao sistema de saúde e proporção de pessoas com doenças que agravam os sintomas da COVID-19, até a subnotificação dos casos. Desta forma, a Tabela 2 apresenta os valores de número de óbitos estimados para diferentes valores de taxa de letalidade. A Tabela 2 também apresenta o número total de infectados estimados em um ano e número de leitos exigidos. Todos os valores obtidos na Tabela 2 foram calculados considerando a desigualdade social que força 14,54% da população da Região Metropolitana de Belém a não conseguirem a efetiva redução da taxa de contágio.

TABELA 2. Resultados de total de infectados, número óbitos e leitos de UTI para a RMB.

Redução da taxa de contágio	Total de infectados	Máximo de Infectados Ativos (Pico da Curva)	Leitos de UTI necessários (5% do máximo dos infectos ativos)	Número de óbitos			
				Taxa de Letalidade China com análise de subnotificação (1,38% [16])	Taxa de letalidade EUA (4% [17])	Taxa de Letalidade Brasil (5,7% [18])	Taxa de Letalidade Mundial (6,23% [17])
20%	2,24 milhões	764,0 mil	38,2 mil	30,9 mil	89,6 mil	127,6 mil	139,5 mil
30%	2,20 milhões	688,0 mil	34,4 mil	30,3 mil	88,0 mil	125,4 mil	137,0 mil
40%	2,16 milhões	600,2 mil	30,0 mil	29,8 mil	86,4 mil	123,1 mil	134,5 mil
50%	2,08 milhões	498,5 mil	24,9 mil	28,7 mil	83,2 mil	118,5 mil	129,5 mil
60%	1,94 milhões	381,4 mil	19,0 mil	26,7 mil	77,6 mil	110,5 mil	120,8 mil
70%	1,70 milhões	246,9 mil	12,3 mil	23,4 mil	68,0 mil	96,9 mil	105,9 mil
80%	0,90 milhões	105,2 mil	5,2 mil	12,4 mil	36,0 mil	51,3 mil	56,0 mil
85%	0,14 milhões	24,5 mil	1,2 mil	1,9 mil	5,7 mil	8,1 mil	8,9 mil

* Os valores de letalidade para EUA e Brasil foram obtidos conforme relatórios disponíveis dia 13/04/2020.

Entre as diversas taxas de letalidade apontadas na literatura atual, a mais otimista estima que há um elevado caso de subnotificação [16]. Por exemplo, no caso do Brasil, estima-se que apenas 7,3% dos casos são reportados. Assim, a taxa de letalidade real é bem inferior à calculada pelos relatórios dos órgãos públicos de saúde dos diversos países do mundo. Nesta situação, para o caso da China, estima-se que a taxa real de letalidade é de 1,38%, o que resultaria em 30,9 mil óbitos casos tenhamos apenas 20%

de redução da taxa de contágio, podendo ser reduzido para 1,2 mil óbitos no caso de 85% de redução da taxa de contágio.

Para o caso mais pessimista, a taxa de letalidade fica em 6,23% [17]. Neste caso, que considera as notificações de casos confirmados e óbitos de 185 regiões diferentes do mundo, o pior cenário traz um total de 139,5 óbitos, quando há apenas 20% de redução da taxa de contágio, e 8,9 mil óbitos quando há redução de 85% da taxa de contágio.

Considerando os números divulgados pelo Ministério da Saúde do Brasil, até a presente data, a taxa de letalidade é de 5,7% [18], o que resultaria em 8,1 mil óbitos no caso de 85% de redução da taxa de letalidade.

É importante observar que não há uma linearidade na redução da taxa de contágio com a redução de leitos de UTI necessários e número de óbitos, sendo necessário reduzir a cerca 80% a taxa de contágio, para que os resultados sejam reduzidos para pouco mais da metade. Apenas após a redução de 80% da taxa de contágio é que ocorre a brusca redução dos resultados de leitos de UTI e óbitos.

Este comportamento ocorre em função do “achatamento da curva” forçar que o valor máximo de infectados ativos seja postergado. Assim, dentro da janela de tempo de 1 ano sendo trabalhada, uma redução superior a 80% da taxa de contágio significa postergar o pico da contaminação para após o período considerado, o que permite que o sistema de saúde tenha tempo para se preparar e para que medicamentos eficientes como antibióticos e vacinas sejam desenvolvidos.

É importante salientar que caso o Governo desenvolva medidas que permitam que as pessoas em condições precárias possam efetivamente reduzir sua taxa de contágio, os valores mais otimistas de leitos de UTI necessários e número de óbitos podem ser atingidos com uma redução de aproximadamente 75% da taxa de contágio, o que significa medidas restritivas menos rígidas, do que as necessárias para alcançar os 85% de redução de taxa de contágio.

Por fim, destaca-se que a redução de taxa de contágio não ocorre exclusivamente pelo isolamento social ou pela redução da mobilidade das pessoas, mas é um fator que envolve reduzir, de modo geral, a aproximação com as demais pessoas, seja pelo isolamento social, seja evitando contatos próximos no dia-a-dia, e manter bons hábitos de higiene, que envolvem desde do uso recorrente de água e sabão para lavagem das mãos e objetos, o uso de máscaras apropriadas, até o devido cuidado de realizar quarentena voluntária sob a observação do menor risco de infecção.

4. Conclusões

Neste estudo foi proposto um novo modelo SEIR para países em desenvolvimento. O novo modelo combina o modelo SEIR clássico com dados demográficos da população, a fim de estimar de maneira mais realista como se dará o espalhamento da COVID-19 em países em desenvolvimento como o Brasil. Comparamos os impactos previstos quanto ao número de infectados e mortes na ausência ou presença de intervenções não farmacêuticas. Um estudo de caso foi realizado para a Região Metropolitana de Belém, Brasil. Os resultados apontaram que é crucial romper as cadeias de transmissão da doença a fim de minimizar seus efeitos. Isso significa que, na ausência de intervenções farmacêuticas, medidas rígidas de distanciamento social da população e o isolamento efetivo de pessoas infectadas são importantíssimas para

diminuir o pico da demanda por leitos hospitalares e, conseqüentemente, o número de vítimas fatais da COVID-19.

Destaca-se que o isolamento efetivo de casos confirmados ajuda a quebrar a corrente de transmissão do vírus, diminuindo o número de casos totais. Sabemos, no entanto, que uma parte da população de países como o Brasil e a Índia não consegue cumprir a recomendação do isolamento por se encontrar em situação socioeconômica precária, como habitações superlotadas e péssimas condições de saneamento. Para amenizar essa situação, pode ser uma alternativa viável o uso de repartições públicas atualmente desocupadas e em boas condições, tais como escolas, para o acolhimento e isolamento de pessoas infectadas não graves, a fim de diminuir a taxa de contaminação secundária na comunidade.

Aqui também destacamos a possibilidade de usar um subgrupo desses locais para acolher pessoas não infectadas em situação de vulnerabilidade social, especialmente as do chamado grupo de risco (incluindo idosos e doentes crônicos), a fim de possibilitar que estas cumpram efetivamente as medidas de distanciamento social impostas pelo governo.

Além disso, uma medida importante é o rastreamento de pessoas que mantiveram/mantém contato com casos confirmados da doença. Isto porque muitos estudos apontam que a infecciosidade da doença começa antes mesmo do início do aparecimento dos sintomas. Ademais, uma parcela dos infectados não apresenta sintomas (são assintomáticos) e ainda assim pode infectar pessoas suscetíveis. Isto faz com que uma parcela da população esteja em processo infeccioso, mesmo sem ter conhecimento, aumentando as chances de novas transmissões. Essa situação também é resultado da subnotificação, que, por sua vez, no Brasil, se deve à falta de realização de testes e na demora para obter os resultados. Portanto, o sucesso do rastreamento de contato e redução do atraso entre o início do isolamento e o início dos sintomas são cruciais, porém dependem de medidas mais rigorosas de monitoramento de casos suspeitos e testagem em massa.

Por fim, nossa análise sugere que a demanda por serviços de saúde só pode ser mantida em níveis administráveis a partir da adoção de medidas rápidas e precisas por parte das autoridades. Atrasos na implementação de estratégias ou o relaxamento precoce de medidas podem levar a novos surtos da doença, tão devastadores quanto o primeiro - daí a importância de ferramentas como os modelos apresentados neste trabalho, os quais são capazes embasar cientificamente as tomadas de decisão. Nessa avaliação, não consideramos os custos das medidas de mitigação, mas sabemos que estes certamente gerarão impactos importantes na economia de todos os países atingidos, especialmente nos países de baixa renda média, que enfrentarão não somente uma crise de saúde, mas também uma crise social e econômica ao longo dos próximos anos. Esta discussão, porém, apesar de relevante, não faz parte do escopo deste estudo.

Referências

- [1] Guo, Yan-Rong, et al. "The origin, transmission and clinical therapies on coronavirus ;disease 2019 (COVID-19) outbreak—an update on the status." *Military Medical Research* 7.1 (2020): 1-10.
- [2] Hellewell, Joel, et al. "Feasibility of controlling COVID-19 outbreaks by isolation of cases and contacts." *The Lancet Global Health* (2020).
- [3] Keeling, Matt J., and Pejman Rohani. *Modeling infectious diseases in humans and animals*. Princeton University Press, 2011.
- [4] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNAD Contínua. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/educacao/17270-pnad-continua.html?edicao=24437&t=o-que-e>>, Acesso em 08 de abril de 2020.
- [5] Peng, Liangrong, et al. "Epidemic analysis of COVID-19 in China by dynamical modeling." *arXiv preprint arXiv:2002.06563* (2020).
- [6] Walker, Patrick GT, et al. "The global impact of covid-19 and strategies for mitigation and suppression." On behalf of the imperial college covid-19 response team, Imperial College of London (2020).
- [7] Ferguson, Neil, et al. "Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID19 mortality and healthcare demand." (2020).
- [8] Tang, Zhou, Xianbin Li, and Houqiang Li. "Prediction of New Coronavirus Infection Based on a Modified SEIR Model." *medRxiv* (2020).
- [9] Kucharski, Adam J., et al. "Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study." *The Lancet Infectious Diseases* (2020).
- [10] Hellewell, Joel, et al. "Feasibility of controlling COVID-19 outbreaks by isolation of cases and contacts." *The Lancet Global Health* (2020).
- [11] Ministério da Saúde. Coronavírus Brasil. Disponível em: <<https://covid.saude.gov.br/>>, Acesso em 08 de abril de 2020.
- [12] CNES. Cadastro Nacional de Estabelecimento de Saúde. Disponível em: <<http://cnes.datasus.gov.br/>>, Acesso em 08 de abril de 2020.
- [13] Federação Brasileira de Hospitais (FBH) e Confederação Nacional de Saúde (CNS). Relatório Cenário dos Hospitais no Brasil - 2019. Disponível em: < http://cnsaude.org.br/wp-content/uploads/2019/05/CenarioDosHospitaisNoBrasil2019CNSaudeFBH.pdf?fbclid=IwAR0DUw0Z1t8CBeA17uYV4TH4gRzJ62ZTWwOIRPxWInkTJlvw6Wm-1Rah_Sc>, Acesso em 08 de abril de 2019.
- [14] Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Hospital Beds. Disponível em: <<https://data.oecd.org/healthq/hospital-beds.htm>>, Acesso em 08 de abril de 2020.
- [15] Secretaria de Saúde Pública do Estado do Pará. Coronavírus no Pará. Disponível em: <<http://www.saude.pa.gov.br/coronavirus/>>, Acesso em 08 de abril de 2020.
- [16] Russel, T. W. et al, Using a delay-adjusted case fatality ratio to estimate under-reporting, Centre for Mathematical Modelling of Infectious Diseases, London School of Hygiene and Tropical medicine. Disponível em: <https://cmmid.github.io/topics/covid19/severity/global_cfr_estimates.html>, acessado em 13 de abril de 2020.
- [17] COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU). Disponível em: <

<https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6>, acessado em 13 de abril de 2020.

[18] Ministério da Saúde, Paineis Coronavírus. Disponível em <<https://covid.saude.gov.br/>>, acessado em 13 de abril de 2020.