

Situação da Covid-19 no Brasil: Análise via Sistema ModInterv de Monitoramento da Epidemia[★]

Giovani L. Vasconcelos^{*} Gerson C. Duarte-Filho^{**}
 Arthur A. Brum^{***} Raydonal Ospina^{****}
 Francisco A. G. Almeida[†] Antônio M. S. Macêdo[‡]

^{*} Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, 81531-990
 Curitiba, PR (e-mail: giovani.vasconcelos@ufpr.br).

^{**} Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000
 São Cristóvão, SE (e-mail: gcdf@ufs.br)

^{***} Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco,
 50670-901 Recife, PE (e-mail: arthurbrum@df.ufpe.br)

^{****} Departamento de Estatística, CASTLab, Universidade Federal de
 Pernambuco, 50740-540 Recife, PE (e-mail: raydonal@de.ufpe.br)

[†] Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000
 São Cristóvão, Se (e-mail: falmeida@ufs.br)

[‡] Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco,
 50670-901 Recife, PE (e-mail: antonio.smacedo@ufpe.br)

Abstract: In this work we analyze the cumulative curves of deaths attributed to Covid-19 in the 26 Brazilian states and the Federal District until August 21, 2020. Mathematical growth models implemented by the ModInterv Covid-19 application, which can be accessed via internet browser or via a mobile app available at the Google Play Store, were used to investigate at which stage the epidemic is in each of these entities of the Federation. The analysis revealed that almost all states in the Northern and Northeastern regions were in the saturation phase, when the epidemic is relatively under control, while in all Southern states and in most states in the Midwest the epidemic was still accelerating or showed only a slight deceleration. The Southeastern region presented a great diversity of epidemic stages, with each state at a different stage, ranging from acceleration to saturation.

Resumo: Neste trabalho nós analisamos as curvas acumuladas de mortes atribuídas à Covid-19 nos 26 estados brasileiros e no Distrito Federal até o dia 21 de agosto de 2020. Foram utilizados modelos matemáticos de crescimento implementados pelo aplicativo ModInterv Covid-19, que pode ser acessado via internet ou através de aplicativo para celular disponível na Google Play Store, para investigar em qual fase da epidemia cada um dessas unidades da federação se encontrava. A análise revelou que quase todos os estados das Regiões Norte e Nordeste encontravam-se em uma fase de saturação, quando a epidemia está relativamente sob controle, ao passo que em todos os estados do Sul e a maioria dos estados do Centro-Oeste a epidemia ainda estavam em aceleração ou apresentavam apenas uma leve desaceleração. A Região Sudeste apresentou uma grande diversidade de estágios da epidemia, com cada estado em um estágio diferente, indo de acelerado à saturação.

Keywords: Covid-19; Epidemiological models; Growth models; Generalized logistic model; Public health policies.

Palavras-chaves: Covid-19; Modelos epidemiológicos; Modelos de crescimento; Modelo logístico generalizado; Políticas de saúde pública.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, passados mais de cinco meses após os primeiros casos de infecção pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2) e de óbitos pela Covid-19, doença causada pelo SARS-CoV-2, os números acumulados de casos e mortes atribuídas à doença não davam sinais de estagnação. No momento da escrita da primeira versão desse artigo, no final de agosto de 2020, tínhamos no Brasil mais de 3,5 milhões de casos confirmados e mais de 110 mil mortes devido à doença, segundo dados oficiais. Olhando a situação estado por estado, era possível observar que alguns deles pareciam estar em uma fase onde os números acumulados de casos, bem como de óbitos, ainda apresentavam um crescimento acelerado, enquanto outros estados pareciam ter alcançado uma etapa onde os números cresciam de modo mais lento ou mesmo já estavam em uma fase final de saturação. Neste contexto de heterogeneidade da epidemia no país, torna-se importante conhecer o estágio de evolução da epidemia de Covid-19 em cada uma das unidades da Federação. Essa visão geral da Covid-19 no país pode auxiliar gestores e autoridades públicas entender como se deu (e ainda se dá) a evolução da epidemia nas diferentes regiões do país. Esse entendimento sobre os diferentes ritmos de evolução da Covid-19 pode ajudar ainda na tomada de decisões para um melhor enfrentamento e controle da epidemia nos diversos estados.

No presente trabalho, nós apresentamos um panorama dos estágios de evolução da Covid-19 nos 26 estados do Brasil e no Distrito Federal, até a data de 21 de agosto de 2020. Para isso, nós utilizamos modelos matemáticos de crescimento para ajustar as curvas acumuladas de mortes atribuídas à Covid-19 em cada uma das unidades da Federação. A partir das projeções do modelo que melhor ajusta os dados de uma dada unidade da Federação, é possível determinar em qual estágio da epidemia essa unidade se encontra.

Os modelos discutidos neste trabalho encontram-se implementados no aplicativo **ModInterv Covid-19** (1), desenvolvido pela nossa Rede de Pesquisa MODINTERV-COVID19 (<http://fisica.ufpr.br/redecovid19>). O aplicativo encontra-se disponível para uso geral via internet (<http://fisica.ufpr.br/modinterv>) ou através de aplicativo para celular Android disponível na Play Store (https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tanxe.covid_19). Nesse aplicativo é possível monitorar as curvas acumuladas de casos e de óbitos da Covid-19 de países, bem como dos estados e cidades do Brasil e dos Estados Unidos. No presente trabalho nós utilizamos o **ModInterv** para traçar um panorama da situação da Covid-19 nos estados do Brasil e no Distrito Federal, até a data de 21 de agosto de 2020.

2. METODOLOGIA

No presente trabalho, nós analisamos as curvas acumuladas de óbitos atribuídos à Covid-19 para os 26 estados do Brasil e o Distrito Federal, através do aplicativo **ModInterv**, com dados atualizados até a data de 21 de agosto de 2020. Os dados utilizados pelo **ModInterv** são automaticamente ‘baixados’ do site covid19br.wcota.me, que por sua vez compila e atualiza os dados a partir dos boletins divulgados pelas secretarias de saúde de cada estado (2).

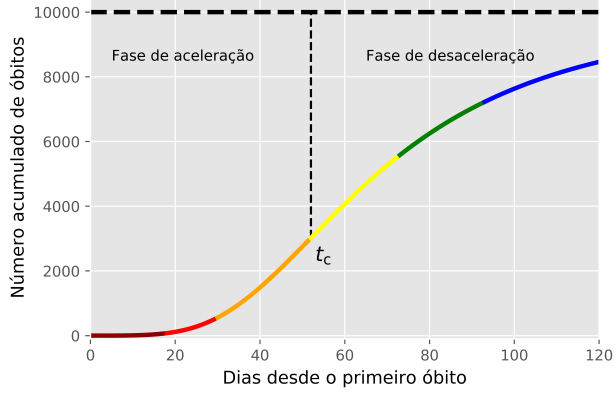
Os dados de óbitos são normalmente classificados pelas respectivas secretarias de saúde de acordo com dia em que os mesmos ocorreram, e não em função do dia em que tais óbitos foram oficialmente divulgados. Dessa forma, uma curva epidêmica para um dado estado representa o número acumulado de óbitos, $C(t)$, que efetivamente ocorreram nesse estado até um determinado tempo t . É inevitável que haja algum tipo de incerteza na coleta dos dados, como sub-notificação ou atraso na confirmação dos óbitos, mas de uma maneira geral os dados de óbitos são considerados mais confiáveis, para efeitos de análise da intensidade da epidemia, do que os dados para casos confirmados, os quais são reconhecidamente muito mais afetados pelo problema de subnotificação. Por essa razão, decidimos restringir nosso estudo à análise das curvas de mortes por Covid-19 para as unidades federativas do Brasil.

Uma curva epidêmica típica (3), representando o número acumulado de óbitos em função do tempo, como ilustrada na Fig. 1(a), apresenta duas fases principais, a saber: i) uma fase de crescimento acelerado, ou seja, com aceleração positiva, e ii) uma fase com crescimento desacelerado, logo com aceleração negativa. Essas duas fases são separadas pelo ponto de inflexão, t_c , da curva acumulada, ponto esse em que a aceleração é nula. Além disso, é possível caracterizar melhor a dinâmica de crescimento da epidemia, a partir dos diferentes regimes de aceleração em cada uma dessas duas fases.

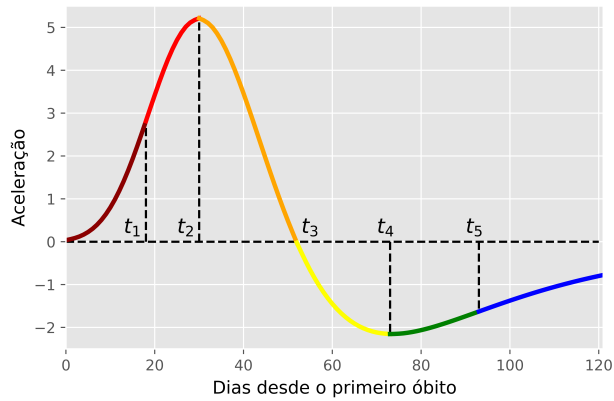
Na Fig. 1(b), nós mostramos a curva de aceleração correspondendo à curva acumulada da Fig. 1(a). A curva de aceleração apresenta cinco pontos característicos, a saber: t_1 é o ponto de inflexão da aceleração no regime de aceleração positiva; t_2 é o ponto de máxima aceleração; $t_3 = t_c$ é o ponto de aceleração nula, correspondendo, portanto, ao ponto de inflexão da curva acumulada; t_4 é o ponto de mínimo da aceleração, logo é o ponto de máxima desaceleração; e t_5 é o ponto de inflexão da aceleração no regime de aceleração negativa. Vale lembrar ainda que a taxa de variação da aceleração é conhecida como “sobre-aceleração” ou “arranque”. Assim, podemos dizer que t_1 e t_5 são pontos de máximo arranque, enquanto t_2 e t_4 são pontos de arranque nulo.

Em face da discussão acima, podemos dividir uma curva epidêmica típica em seis estágios de crescimento, ao quais atribuímos uma escala de cores, vide Fig. 1(b), a saber: 1. Aceleração e arranque crescentes (estágio vermelho escuro); 2. Aceleração crescente e arranque decrescente (estágio vermelho claro); 3. Aceleração decrescente (estágio laranja); 4. Desaceleração crescente (estágio amarelo); 5. Desaceleração decrescente e arranque crescente (estágio verde); 6. Desaceleração e arranque decrescentes (estágio azul). As regiões da curva acumulada correspondendo a es-

* Este trabalho foi apoiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através dos processos de bolsa de produtividade de Nos. 303772/2017-4 (GLV), 312612/2019-2 (AMSM) e 305305/2019-0 (RO). AAB agradece o apoio do CNPq através de bolsa de doutorado (processo 167348/2018-3). RO agradece a D.A.D.O. e CASTLab.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Esboço qualitativo da curva epidêmica para o número acumulado de óbitos, com indicação de suas duas fases principais, a saber: as fases de aceleração e desaceleração, respectivamente. O ponto t_c indica o ponto de inflexão da curva, onde a aceleração é nula, que separa as duas fases. (b) Curva de aceleração, correspondendo à segunda derivada temporal da curva acumulada mostrada em (a). As diferentes cores em ambas as curvas indicam os estágios da epidemia, de acordo com o regime de aceleração; vide texto.

ses regimes de aceleração estão indicadas pelas respectivas cores na Fig. 1(a).

Nos dois estágios iniciais (vermelho escuro e claro na Fig. 1), tem-se um crescimento rápido da curva epidêmica, uma vez que a aceleração é sempre crescente. Nos dois estágios seguintes (laranja e amarelo), temos a fase intermediária da curva epidêmica, quando o crescimento é aproximadamente linear, visto que esses dois estágios estão próximos do ponto de inflexão, no qual a aceleração é nula. Os dois últimos estágios (verde e azul) caracterizam a fase final da epidemia. Note que a partir do quinto estágio (verde), a curva começa a se “dobrar” mais fortemente, afastando-se assim do regime quase-linear, de modo que a epidemia inicia uma transição para a fase de saturação. O último estágio (azul) corresponde ao regime de saturação propriamente dito, quando as três primeiras derivadas da curva $C(t)$ são todas decrescentes. Nesse estágio, pode-se dizer que a epidemia está sob controle. (Se, contudo, as medidas de controle forem relaxadas prematuramente, pode haver um recrudescimento das infecções e a curva de

óbitos pode voltar a crescer, causando a chamada ‘segunda onda’ de infecções. Esses efeitos, entretanto, não serão considerados na presente análise.)

Dada uma curva epidêmica real, é importante determinar em que estágio a epidemia encontra-se naquele local. Para tanto, faz-se necessário primeiro ter um modelo matemático que permita obter uma curva teórica que descreva os dados, a partir da qual podemos calcular os pontos característicos t_i , $i = 1, 2, 3, 4, 5$, que definem os diferentes estágios de uma curva epidêmica, como ilustrado na Fig. 1(b). O sistema **ModInterv** implementa quatro modelos de crescimento, com diferentes níveis de complexidade.

O modelo mais geral, dos quais os demais são casos particulares, é o modelo logístico beta (MLB), descrito pela seguinte equação diferencial ordinária (4; 5):

$$\frac{dC}{dt} = r [C(t)]^q \left[1 - \left(\frac{C(t)}{K} \right)^\alpha \right]^p, \quad (1)$$

onde r é a taxa de crescimento no estágio inicial, K é o tamanho final da epidemia, q controla o regime de crescimento inicial e permite interpolar de crescimento linear ($q = 0$) para crescimento subexponencial ($q < 1$) para crescimento puramente exponencial ($q = 1$), o expoente p controla a taxa de aproximação ao platô, com $p > 1$ implicando uma taxa polinomial, enquanto $p = 1$ produz uma aproximação exponencialmente rápida, e expoente α é o chamado parâmetro de assimetria. O MLB tem como casos particulares de interesse os seguintes modelos: o modelo de Richards generalizado (MRG), quando $p = 1$; o modelo de Richards (MR), para $q = p = 1$; e o modelo q -exponencial, no caso em que $p = 0$. Mais detalhes sobre os modelos acima podem ser encontrados nas referências (4; 5; 6).

O MLB recupera ainda o modelo logístico padrão, no caso em que $q = p = \alpha = 1$, e por isso a Eq. (1) é conhecida também como equação logística generalizada (4). Vale lembrar, contudo, que o modelo logístico descreve uma curva de crescimento simétrica em relação ao ponto de inflexão. Mas como essa simetria raramente é observada nas curvas empíricas de Covid-19, esse caso particular não está implementado separadamente no **ModInterv**. Note, entretanto, que no caso do modelo de Richards, em que $q = p = 1$, o expoente α é livre para variar, de modo que uma curva simétrica pode em princípio ser obtida se o ajuste numérico retornar o valor $\alpha = 1$.

Para uma dada curva epidêmica, o aplicativo **ModInterv** procura inicialmente ajustar os dados empíricos com o MLB. Entretanto, a convergência desse modelo só acontece em geral para curvas que já estejam em uma fase de saturação, o que permite estimar o expoente p que controla a aproximação ao platô. Caso não haja convergência do MLB, o **ModInterv** testa na sequência o MRG. Esse modelo assume um comportamento exponencial na fase de saturação (isto é, $p = 1$), mas ainda requer o ajuste numérico de dois expoentes: o expoente q , que controla o crescimento subexponencial no início, e o expoente de assimetria α . Por essa razão, o MRG só produz um bom ajuste quando a curva já está na fase de desaceleração. Caso o MRG não convirja satisfatoriamente, aplica-se então o MR. Por ser um modelo que assume comportamento exponencial tanto no início quanto no final da curva (isto

é, $q = p = 1$), o MR requer o ajuste apenas do expoente de assimetria α , sendo portanto o modelo mais robusto quanto à convergência. De uma maneira geral, o MR é mais apropriado para curvas epidêmicas em um estágio intermediário, mas ele se aplica também a curvas em estágios mais avançados, naqueles casos em que nem o MLB nem o MRG mostram-se adequados.

Uma vez obtida a curva teórica que melhor descreve os dados, dentre os modelos MLB, MRG e MR, o ModInterv compara a posição do ponto correspondendo à última data, t_f , da curva empírica com os pontos característicos t_i , obtidos do modelo matemático, e determina o estágio da epidemia de acordo com a seguinte classificação:

- (1) Aceleração crescente (estágio vermelho): $t_f < t_2$.
- (2) Aceleração decrescente (estágio laranja): $t_2 < t_f < t_3$.
- (3) Desaceleração crescente (estágio amarelo): $t_3 < t_f < t_4$.
- (4) Transição para saturação (estágio verde): $t_4 < t_f < t_5$.
- (5) Saturação (estágio azul): $t_f > t_5$.

Vale destacar aqui que a distinção entre os estágios de arranque crescente e arranque decrescente na fase inicial do crescimento (estágios vermelho escuro e vermelho claro na Fig. 1) não é muito relevante do ponto de vista prático, uma vez que o primeiro estágio é relativamente curto. Por isso, esses dois estágios são tratados na classificação acima como um só, qual seja, o estágio de aceleração crescente. Além disso, quando o aplicativo ModInterv identifica uma curva empírica nesse estágio, o ajuste dos dados é feito com o modelo q -exponencial, ou seja, com $p = 0$ na Eq. (1). Isso é necessário porque no estágio de aceleração crescente a curva epidêmica ainda está longe de atingir o ponto de inflexão, de modo que é preferível usar o modelo q -exponencial, que descreve apenas o crescimento inicial.

Em todos os ajustes numéricos dos dados, para qualquer um dos quatro modelos implementados pelo ModInterv, utilizamos o algoritmo de Levenberg-Marquardt para resolver o problema de otimização não-linear pelo método dos mínimos quadrados (7). Os códigos computacionais para realizar os ajustes são escritos na linguagem Python, conforme implementados no pacote *lmfit* (8).

Uma vez identificado o modelo que melhor descreve uma dada curva empírica, o sistema ModInterv exibe as figuras das curvas acumulada e diária de óbitos, mostrando os dados empíricos e os respectivos ajustes teóricos. No título da figura são informados a localidade em questão e o modelo que melhor ajustou aquela curva, enquanto na legenda da figura são informados os parâmetros de ajuste bem como o estágio da epidemia naquele local.

3. RESULTADOS

A Fig. 2 mostra o mapa do Brasil em que cada estado e o Distrito Federal são pintados com a cor correspondente ao estágio da epidemia em que a referida unidade da federação encontrava-se no dia 21 de agosto de 2020. Essa data foi escolhida para balizar o presente estudo, porque corresponde a um período em que todas as cinco estágios da epidemia de Covid-19 ainda estavam representados no Brasil.

Estágios da Covid-19 nos Estados do Brasil

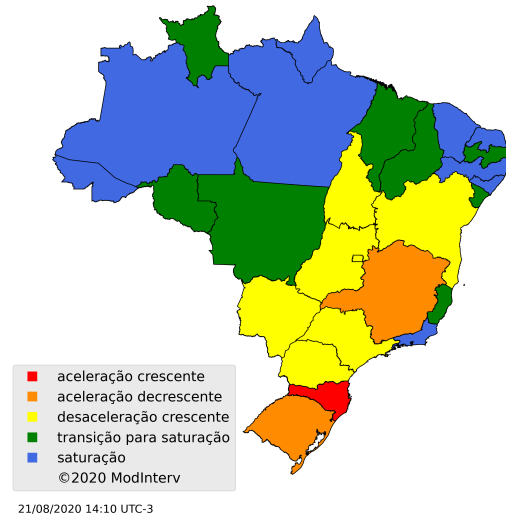


Figura 2. Situação em 21 de agosto de 2020 dos vinte e seis estados e Distrito Federal, segundo a classificação de estágios da epidemia implementada no sistema ModInterv.

A seguir apresentamos as figuras produzidas pelo ModInterv para cada uma das unidades da federação, organizadas em grupos de acordo com os respectivos estágios da epidemia. No painel esquerdo de cada figura, apresentamos as curvas empírica (círculos vermelhos) e teórica (curva contínua preta) para o número acumulado de óbitos atribuídos à Covid-19; enquanto no painel da direita mostramos a curva diária de óbitos, juntamente com a derivada dC/dt da curva teórica $C(t)$ mostrada no respectivo painel da esquerda.

3.1 Estado com aceleração crescente

Os dados empíricos do estado de Santa Catarina foram melhor ajustados pelo modelo de crescimento q -exponencial, como mostrado no painel à esquerda da Fig. 3, indicando que, nessa localidade, o crescimento do número de óbitos devido à Covid-19 ainda apresentava aceleração crescente. No painel à direita vemos o número diário de óbitos, juntamente com a derivada da curva teórica, onde se pode ver que a concordância entre dados e teoria também é muito boa para os dados diários.

Olhando a Fig. 3, percebemos um crescimento linear, que vai aproximadamente até o 60º dia após o primeiro óbito. Isso mostra que nos primeiros dois meses a curva epidêmica de Santa Catarina apresentava um regime de baixo cresci-

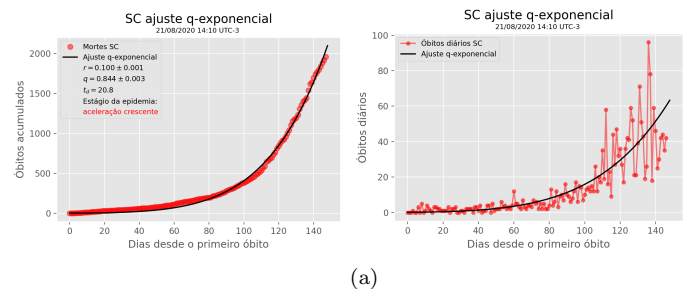


Figura 3. Estado em estágio de aceleração crescente.

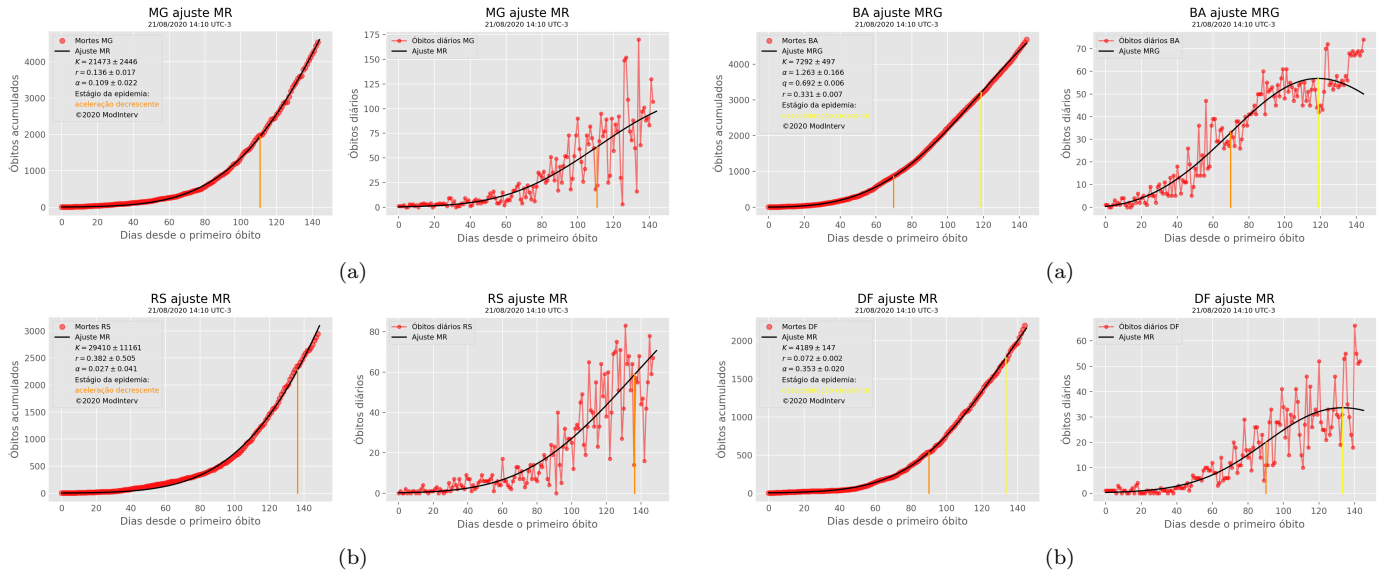


Figura 4. Estados em estágio de aceleração decrescente.

mento (tecnicamente com aceleração quase nula, ou seja, $q \approx 0$), como reflexo das medidas de intervenção não farmacológicas adotadas no início da pandemia; mas depois, com a flexibilização prematura dessas medidas, a curva mudou de trajetória e teve uma espécie de “relargada”, passando a um crescimento quase exponencial (ou seja, com q próximo de 1).

3.2 Estados no estágio de aceleração decrescente - II.

Os estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul encontravam-se no primeiro estágio por uma aceleração decrescente. As respectivas curvas epidêmicas desses dois estados são mostradas na Fig. 4. Pode-se ver em ambas as figuras que o último ponto de cada uma das curvas empíricas já ultrapassara a linha laranja, correspondendo ao ponto t_2 de máxima aceleração, mas não houvera ainda a formação (nos dados) do ponto de inflexão.

Pode-se ver na Fig. 4 que os estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul, tal como Santa Catarina, também apresentaram (pelas razões já mencionadas) uma súbita mudança de tendência por volta do segundo mês de epidemia, passando de um regime linear para um crescimento quase-exponencial. Entretanto, esses dois estados já tinham deixado o regime de aceleração crescente e encontravam-se no momento da presente análise no estágio de aceleração decrescente.

3.3 Estados no estágio de desaceleração crescente

Os estados da Bahia, Goiás, Mato do Grosso do Sul, Paraná, São Paulo, Tocantins e Distrito Federal estavam no segundo estágio da fase intermediária, caracterizada por uma desaceleração crescente, como pode ser vista nas Figs. 5-6. Os ajustes matemáticos sugerem que esses locais já tinham passado pelo ponto de inflexão (indicado pela linha amarela), ou seja, tinham iniciado a fase de desaceleração da epidemia, mas não tendo ainda atingido o ponto t_4 de máxima desaceleração.

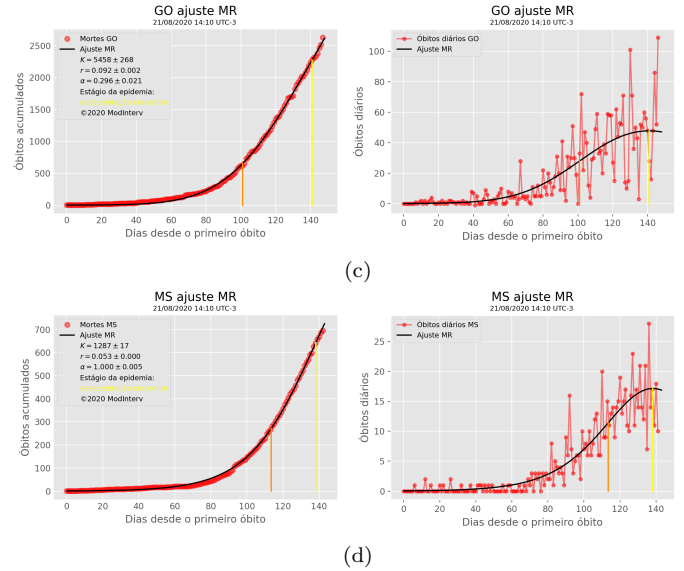


Figura 5. Estados em estágio de desaceleração crescente - I.

3.4 Estados no estágio de transição para saturação

Os estados do Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Paraíba, Piauí, Rondônia e Sergipe encontravam-se no estágio de transição para saturação, conforme pode ser visto na Figs. 7-8. Como discutido anteriormente, nesse estágio as curvas epidêmicas já passaram do ponto t_4 de máxima desaceleração (linha verde) e já estavam em um regime de desaceleração decrescente mas ainda com um arranque crescente, o qual contribui para que a curva se afaste da tendência de crescimento linear típica da fase intermediária. Em outras palavras, o arranque faz a curva se “dobrar” e assim deixar o regime quase linear. Podemos dizer com um certo grau de confiabilidade que, para os estados nesse estágio, “o pior já passou” e a epidemia começa a ficar sob controle.

3.5 Estados no estágio de saturação

Temos, por fim, os estados do Acre, Alagoas, Amazonas, Amapá, Ceará, Pará, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio

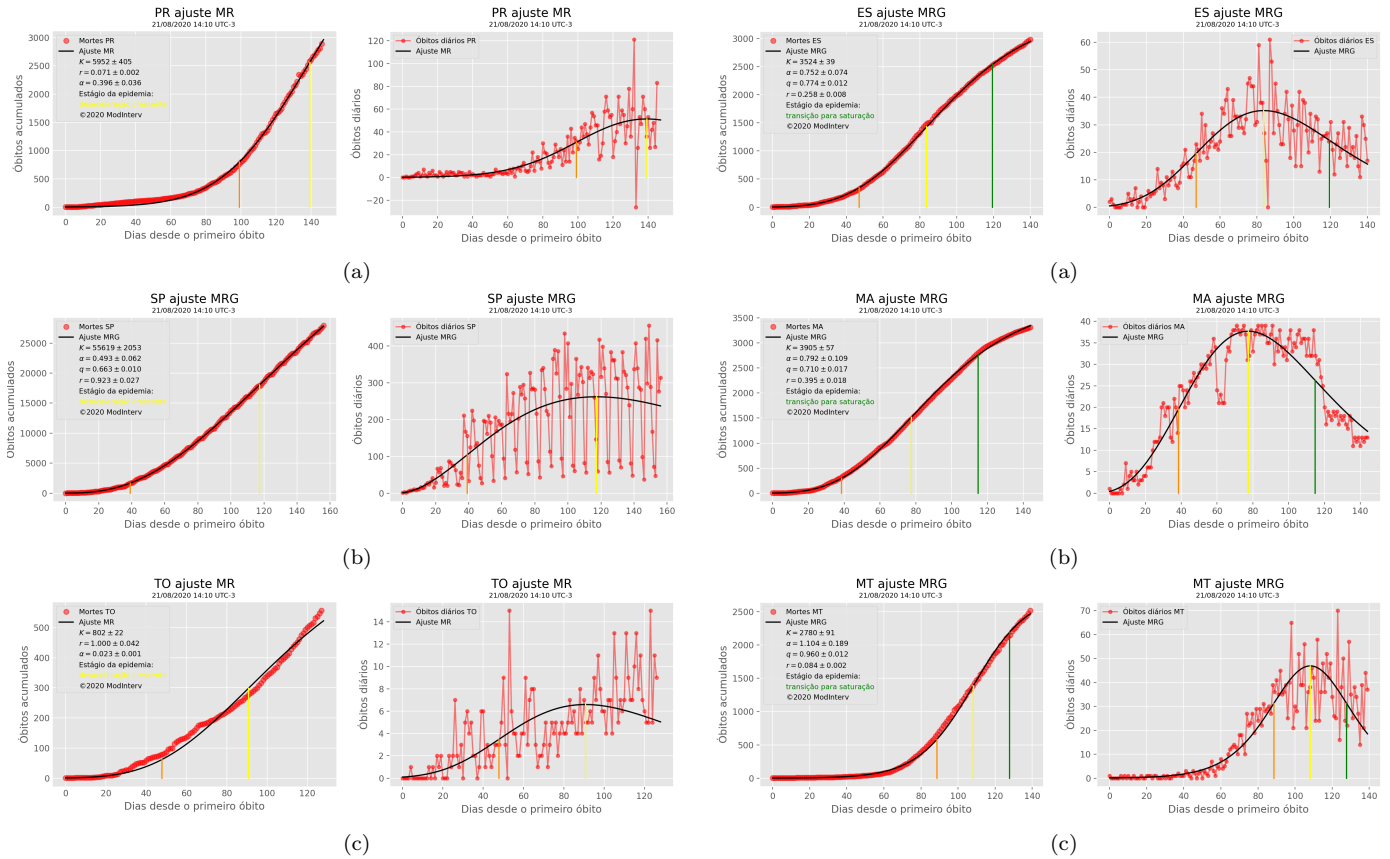


Figura 6. Estados em estágio de desaceleração crescente.

Grande do Norte e Roraima, que já estavam no estágio de saturação propriamente dito, como pode ser visto na Fig. 9-10. Nesse estágio, a curva epidêmica já ultrapassou a linha azul, que corresponde ao ponto t_5 de máximo arranque. Temos, portanto, que nesse último estágio da epidemia a velocidade, a aceleração e a sobre-aceleração da curva epidêmica são todas decrescentes, de modo que a epidemia se aproxima do platô final. Pode-se dizer, portanto, que nesse estágio a epidemia estaria sob controle, se mantida a tendência de saturação até então observada.

4. DISCUSSÃO

Neste trabalho nós aplicamos quatro modelos de crescimento implementados na plataforma ModInterv para estudar as curvas acumuladas de óbitos atribuídas à Covid-19 dos estados brasileiros e do Distrito Federal, até a data de 21 de agosto de 2020. Concluímos que Santa Catarina era o único estado que ainda se encontrava em um regime de aceleração crescente em sua curva epidêmica. Os outros dois estados da Região Sul, Rio Grande do Sul e Paraná, haviam saído recentemente desse regime e encontravam-se nos estágios de aceleração decrescente e desaceleração crescente, respectivamente.

Por outro lado, todos os estados das Regiões Norte e Nordeste, com exceção da Bahia e Tocantins, encontravam-se nos estágios de transição para a saturação (MA, PB, PI, RO e SE) ou de saturação (AL, AM, AP, CE, PE, RR e RN), que são os dois estágios finais da epidemia (se não houver recrudescimento da mesma). Bahia e Tocantins encontravam-se no estágio de desaceleração crescente mas

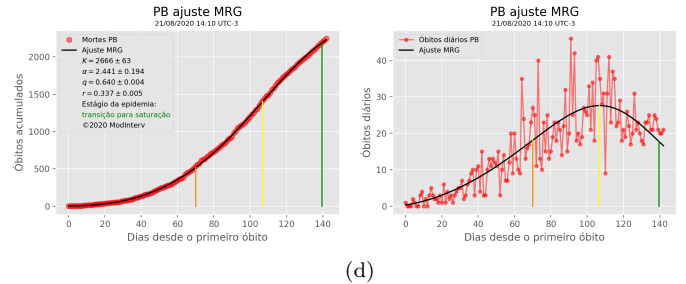


Figura 7. Estados em estágio de transição para saturação - I.

ainda não tinham atingido a transição para a fase de saturação.

Dos estados do Centro-Oeste, apenas Mato Grosso já havia iniciado a transição para a saturação, sendo que Goiás, Mato Grosso do Sul e o Distrito Federal ainda estavam no estágio de desaceleração crescente.

A região Sudeste é a que apresentavam a maior diversidade de estágios da epidemia, sendo que cada estado encontrava-se em um estágio diferente, a saber: Minas Gerais no estágio de aceleração decrescente, São Paulo no estágio de desaceleração crescente, Espírito Santo no estágio de transição para a saturação e o Rio de Janeiro no estágio de saturação.

A presente análise permite concluir, de uma maneira geral, que a região setentrional do Brasil encontrava-se em uma fase mais avançada do controle da pandemia de Covid-19, ao passo que nos estados mais meridionais a epidemia ainda estavam em aceleração ou apresentavam apenas uma leve desaceleração. Esse panorama geral reflete, em grande medida, a evolução da epidemia nas diferentes regiões do

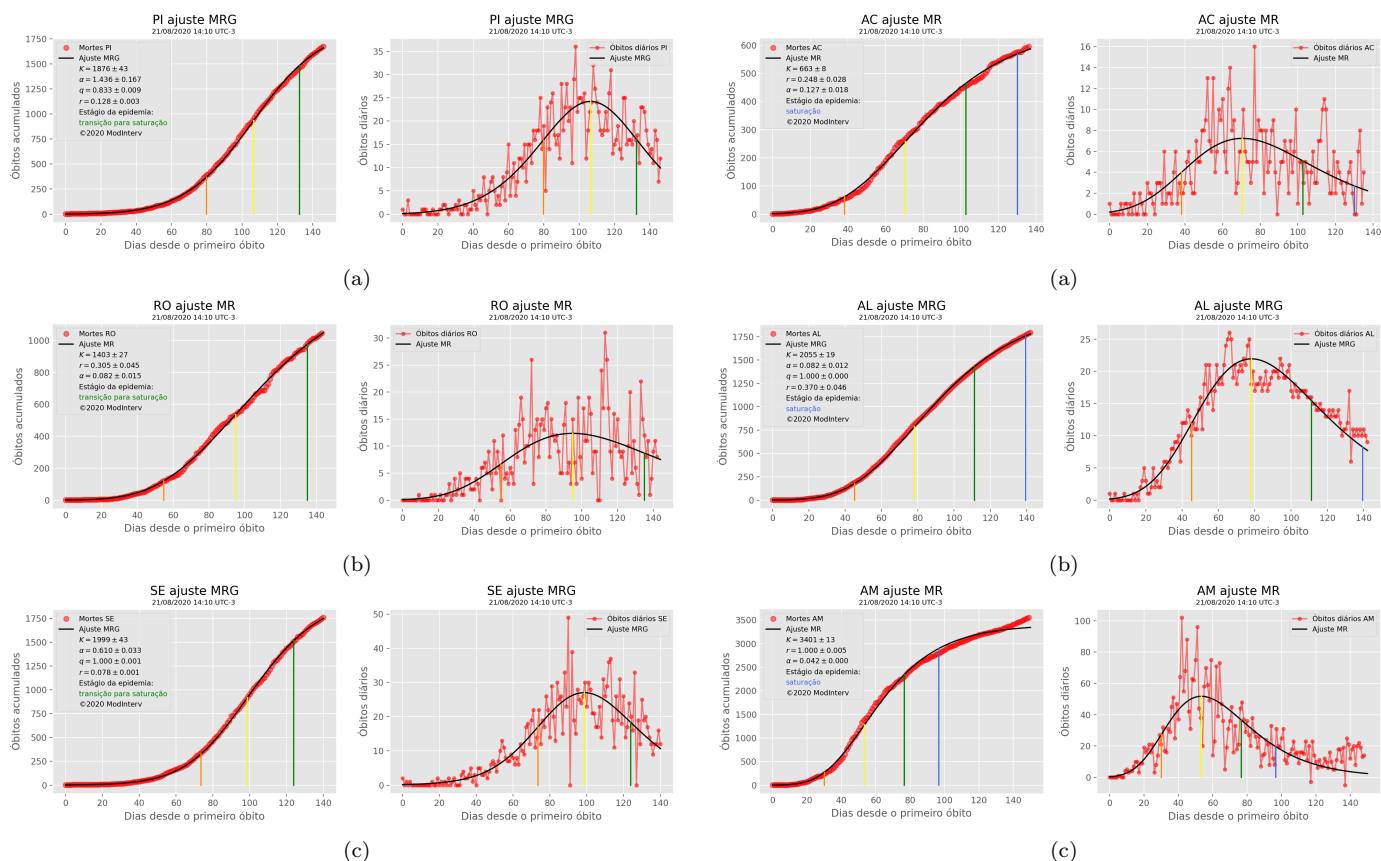


Figura 8. Estados em estágio de transição para saturação-II.

país. Por exemplo, em muitas capitais dos estados do Norte e Nordeste houve um crescimento muito acelerado do número de óbitos nos primeiros meses da epidemia, o que forçou as autoridades locais a adotarem medidas mais drásticas de contenção da propagação do vírus, as quais por sua vez foram capazes de “dobrar” a curva epidêmica em direção ao platô. Nos estados do Sul, a evolução deu-se ‘ao contrário’: o crescimento inicial da curva epidêmica foi lento, tendo havido um relaxamento prematuro das medidas de mitigação, o que levou por sua vez a um recrudescimento da epidemia—foi o fenômeno da “relargada” mencionado antes. Como consequência dessa relargada, a maioria dos estados do Sul ainda estavam em fase de aceleração (RS e SC) ou leve desaceleração (PR).

Outros estados que apresentaram esse efeito de relargada foram Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Esses estados já haviam deixado a fase de aceleração constante, mas ainda estavam longe da fase de saturação, estando Minas Gerais ainda no estágio de aceleração decrescente e Goiás e Mato Grosso do Sul no estágio de desaceleração crescente. Outro exemplo interessante é o estado de São Paulo, que manteve medidas de mitigação por um tempo considerável. Essas medidas fizeram com que a curva deixasse o estágio de aceleração crescente relativamente cedo, vide Fig. 6(b), mas não foram suficientes para “dobrar” a curva e interromper o crescimento quase linear da fase intermediária—dessa forma o estado permanecia ainda no estágio de desaceleração crescente.

É preciso reforçar que os ajustes matemáticos apresentados aqui indicam a tendência da evolução da epidemia

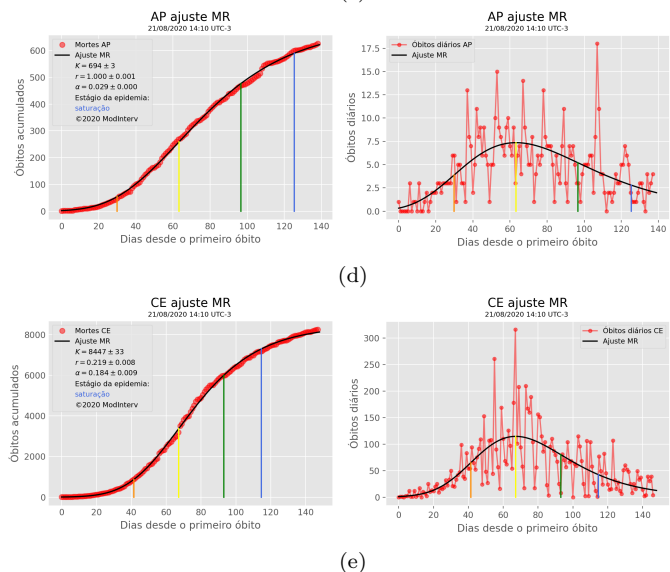


Figura 9. Estados em estágio de saturação - I

nas respectivas unidades da Federação, na data em que a presente análise foi feita. A evolução a partir dessa data pode ter sido fortemente influenciada em função da manutenção ou relaxamento de medidas de controle da epidemia. Por exemplo, nos estados que já estavam na fase de saturação, permanecia o risco de recrudescimento da curva de contágio, o que poderia levar a uma re-aceleração da epidemia, causando a chamada “segunda onda” de infecções. Esses efeitos serão estudados posteriormente, uma vez que requerem o emprego de modelos mais complexos com parâmetros dependentes do tempo.

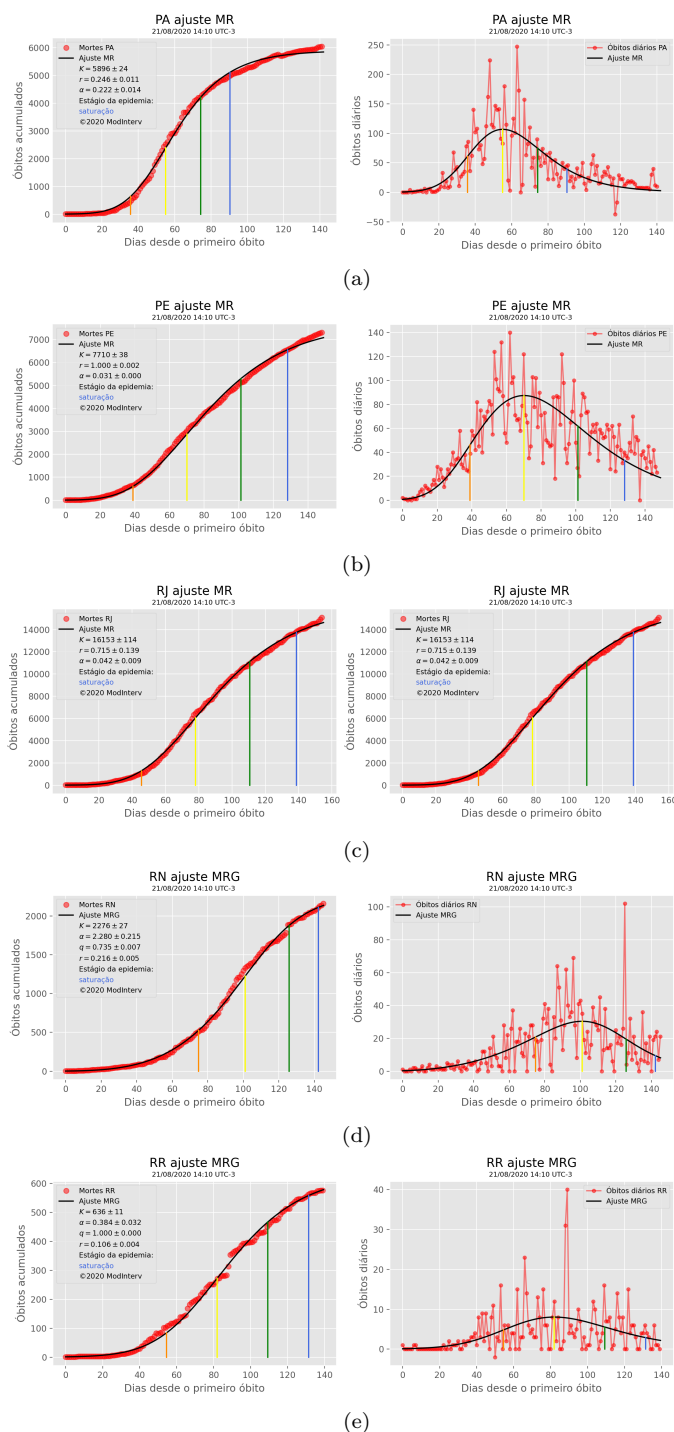


Figura 10. Estados em estágio de saturação - II

REFERÊNCIAS

- [1] Arthur A. Brum, Gerson C. Duarte-Filho, and Giovanni L. Vasconcelos. Application Modinterv Covid-19. Available at: fisica.ufpr.br/modinterv, 2020.
- [2] Wesley Cota, Monitoring the number of COVID-19 cases and deaths in Brazil at municipal and federative units level, Scielo Preprints, 2020 <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.362>.
- [3] Matt J. Keeling e Pejman Rohani, *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals* (Princeton University Press, Princeton, 2008).

- [4] A. Tsoularis e J. Wallace. Analysis of logistic growth models, *Math. Biosciences* 179, 21–55(2002).
- [5] Giovanni L. Vasconcelos, Antônio M. S. Macêdo, Gerson C. Duarte-Filho, Arthur A. Araújo, Raydonal Ospina and Francisco A. G. Almeida. Complexity signatures in the Covid-19 epidemic: power law behaviour in the saturation regime of fatality curves. *medRxiv*, 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.07.12.20152140>.
- [6] Giovanni L. Vasconcelos, Antônio M.S. Macêdo, Raydonal Ospina, Francisco A.G. Almeida, Gerson C. Duarte-Filho, Arthur A. Brum, e Inês C.L. Souza. Modelling fatality curves of Covid-19 and the effectiveness of intervention strategies. *PeerJ*, 8:e9421, June 2020.
- [7] J. J. Moré, The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. Em *Proceedings of the 1977 Dundee conference on numerical analysis, Lecture Notes in Mathematics* 630. G. A. Watson. (ed.) Berlin, Springer, 1978, pp. 105–116.
- [8] M. Newville, T. Stensitzki, D. B. Allen e A. Ingargiola, Non-linear least-squares minimization and curve-fitting for Python, Zenodo, 2014. <http://doi.org/10.5281/zenodo.11813>