

# Recife e Belém são atualmente as únicas capitais que já estão na fase de saturação da Covid-19 no Brasil

## Recife and Belém are currently the only capitals that are already in the saturation phase of Covid-19 in Brazil

Gerson C. Duarte-Filho <sup>1</sup>, Arthur A. Brum <sup>2</sup>, Raydonal Ospina <sup>3</sup>, Francisco A. G. Almeida <sup>4</sup>, Antônio M. S. Macêdo <sup>5</sup> and Giovani L. Vasconcelos <sup>6</sup>

### Resumo:

Nessa nota técnica analisamos as curvas acumuladas de mortes atribuídas à Covid-19 nas 27 capitais brasileiras até o dia 19 de julho de 2020. Empregamos três modelos matemáticos de crescimento para avaliar em que fase da epidemia encontra-se cada uma dessas cidades. Esses modelos foram implementados no aplicativo Modinterv Covid-19, desenvolvido pelas Universidades Federais do Paraná, Pernambuco e Sergipe, o qual pode ser acessado através da página <<http://fisica.ufpr.br/modinterv>>. A análise revela que apenas Recife e Belém aparentam ter atingido a fase de saturação da epidemia, quando a curva acumulada de morte começa a se aproximar do platô. Entre as demais capitais, oito ainda estão na fase inicial de crescimento rápido e dezessete estão na fase intermediária, quando a curva epidêmica já passou pelo ponto de inflexão mas ainda está relativamente distante do platô.

### Abstract:

In this technical note we analyze the accumulated fatality curves attributed to Covid-19 in the 27 Brazilian state capitals until July 19, 2020. We employed three mathematical growth models to assess at which stage of the epidemic each of these cities is at. These models were implemented in the Modinterv Covid-19 application, developed by the Federal Universities of Paraná, Pernambuco and Sergipe, which can be accessed through the <<http://fisica.ufpr.br/modinterv>> page. The analysis reveals that only Recife and Belém appear to have reached the saturation phase of the epidemic, when the accumulated fatality curve begins to approach the plateau. Among the other capitals, eight are still in the initial phase of rapid growth and seventeen are in the intermediate phase, when the epidemic curve has already passed through the inflection point but is still relatively far from the plateau.

## INTRODUÇÃO

A pandemia da Covid-19, doença causada pela infecção do novo coronavírus (SARS-CoV-2), tornou-se a maior crise sanitária que o mundo enfrenta desde o primeiro surto da influenza (H1N1)

<sup>1</sup>Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000 São Cristóvão, Brazil {gcdf@ufs.br}. ORCID: <<https://orcid.org/0000-0003-4975-4981>>

<sup>2</sup>Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901 Recife, Brazil {arthurbrum@df.ufpe.br}. ORCID: <<https://orcid.org/0000-0002-2843-042X>>

<sup>3</sup>Departamento de Estatística, CASTLab, Universidade Federal de Pernambuco, 50740-540 Recife, Brazil {raydonal@de.ufpe.br}. ORCID: <<https://orcid.org/0000-0002-9884-9090>>

<sup>4</sup>Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000 São Cristóvão, Brazil {falmeida@ufs.br}. ORCID: <<https://orcid.org/0000-0002-9884-9090>>

<sup>5</sup>Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901 Recife, Brazil {antonio.smacedo@ufpe.br}. ORCID: <<https://orcid.org/0000-0002-4522-031X>>

<sup>6</sup>Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, 81531-990 Curitiba, Brazil {giovani.vasconcelos@ufpr.br}. ORCID: <<https://orcid.org/0000-0001-6609-5960>>

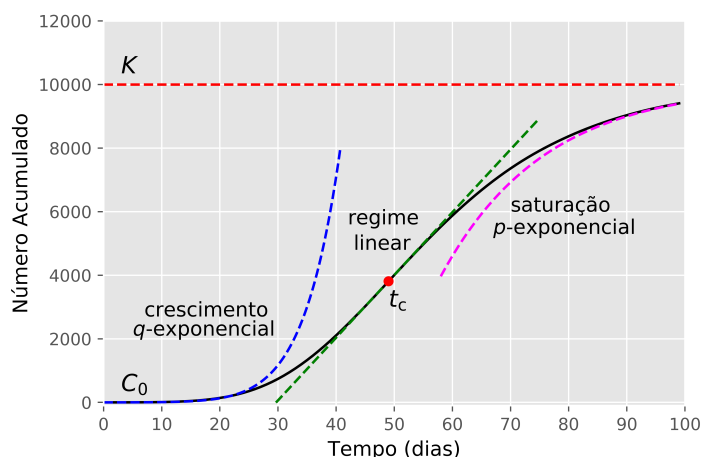


Figura 1: Esboço qualitativo da curva epidêmica (preto) para o número acumulado de casos, com indicação de suas diferentes ‘fases’. O círculo vermelho indica o ponto de inflexão da curva

há mais de cem anos. O Brasil é hoje o segundo país em número de casos confirmados, com mais de dois milhões de casos confirmados, e também o segundo lugar em número de óbitos atribuídos à Covid-19, com quase oitenta mil mortes até o momento em que essa nota é redigida segundo dados do Worldometer [1]. Apesar de a situação do país, como um todo, ainda não estar clara, no que diz respeito ao final da pandemia, uma análise criteriosa das curvas acumuladas de mortes atribuídas à Covid-19 indica que algumas capitais estão caminhando para o estágio final da epidemia, ou que pelo menos já passaram pela pior fase da mesma.

Com a finalidade de acompanhar a evolução da epidemia da Covid-19 no Brasil e diagnosticar em que estágio as capitais brasileiras se encontram, nós utilizamos nessa nota técnica três modelos de crescimento, para ajustar as curvas acumuladas de mortes atribuídas à doença para cada uma das 26 capitais dos estados e do Distrito Federal. Através da avaliação do modelo que melhor ajusta os dados de uma dada capital, é possível determinar em qual estágio da epidemia essa cidade se encontra. Entender a fase da epidemia de um determinado local é de extrema importância para auxiliar gestores e autoridades públicas, pois permite identificar quando medidas mais rigorosas para o enfrentamento da doença precisam ser tomadas, ou quando uma possível flexibilização dessas medidas já pode ser considerada.

Os modelos discutidos nessa nota encontram-se implementados no aplicativo Modinterv Covid19, que nós desenvolvemos e que se encontra disponível para uso geral na página <<http://fisica.ufpr.br/modinterv>>. Nesse aplicativo é possível monitorar as curvas acumuladas de casos e de óbitos pela Covid-19 de países, além de estados e cidades brasileiras.

## MÉTODOS

De maneira simples podemos dividir a curva epidêmica para o número acumulado de óbitos em função do tempo em três regiões: i) uma fase inicial de crescimento rápido; ii) uma região intermediária, onde a curva cresce aproximadamente de modo linear; e iii) uma parte final, quando a taxa de crescimento diminui e a curva tende a um platô de saturação, ver figura 1.

Utilizamos a plataforma Modinterv (<<http://fisica.ufpr.br/modinterv>>) que aplica essencialmente três modelos matemáticos e escolhe aquele que melhor se ajusta aos dados de mortes atribuídas à Covid-

19 para uma determinada capital. Cada um desses três modelos é mais apropriado para uma determinada fase da epidemia, de modo que eles permitem identificar em qual das três fases mencionadas acima encontra-se a respectiva curva epidêmica considerada. O primeiro modelo utilizado é o chamado modelo  $q$ -exponencial, que se aplica àquelas localidades onde a epidemia ainda se encontra em sua fase inicial de crescimento. Esse crescimento inicial em geral dá-se de forma exponencial; contudo, quando medidas de mitigação são adotadas no início da epidemia, é possível que esse crescimento dê-se de forma subexponencial, portanto mais lenta que o crescimento exponencial. Esse crescimento subexponencial é descrito pelo parâmetro  $q$ , que pode variar de  $q = 0$  (crescimento linear) a  $q = 1$  (crescimento exponencial), para  $0 < q < 1$  temos o crescimento subexponencial.

O modelo de Richards (de sigla RM, em inglês) se aplica aos locais onde é possível observar um ponto de inflexão na curva acumulada de mortes, denotado na figura 1 por  $t_c$ , que corresponde ao instante de tempo onde a curva muda de concavidade. Em geral, esse modelo é adequado quando a curva epidêmica já deixou a fase de crescimento exponencial e encontra-se em um regime de crescimento linear (portanto mais lento). Essa transição para o regime linear, e o conseqüente surgimento de um ponto de inflexão, assinala a saída da fase inicial e a entrada na fase intermediária da epidemia.

O modelo logístico beta (com sigla BLM em inglês) é o mais indicado quando é possível observar a tendência da curva de se aproximar do platô, que é indicado pela linha vermelha tracejada da figura 1 e denotado pelo parâmetro  $K$ . A “altura”  $K$  do platô representa o número total de mortos ao final da epidemia. Esse comportamento, de aproximação do platô, indica que a epidemia está se aproximando do fim. O modelo BLM contém ainda um parâmetro  $p$ , que controla a rapidez com que a curva se aproxima do platô: para  $p = 1$  essa aproximação dá-se de forma exponencialmente rápida; ao passo que para  $p > 1$  a aproximação se dá de maneira mais lenta (polinomial). Assim vemos que quanto menor (maior)  $p$  mais rápida (lenta) a curva epidêmica tende ao platô. Mais informações sobre os modelos de crescimento utilizados nessa NT podem ser encontradas em [2, 3, 4].

## RESULTADOS

Analisamos os dados disponíveis no site covid19br.wcota.me, mantido por Wesley Cota, da Universidade Federal de Viçosa. Na presente análise foram utilizados dados até o dia 19 de julho. Os dados de cada capital são puxados automaticamente pelo aplicativo Modinterv, que realiza a rotina não-linear de mínimos quadrados de Levenberg-Marquardt, utilizando o pacote LMFIT da linguagem de programação Python. O algoritmo avalia qual dos três modelos de crescimento é o que melhor ajusta os dados [5].

Das capitais analisadas apenas em duas o modelo BLM foi o que melhor ajustou os dados empíricos, a saber, Recife, mostrado na fig. 2, e Belém, na figura 3. O primeiro detalhe que chama a atenção é o valor do parâmetro  $q$  para ambas:  $q = 0.7$  para Recife e  $q = 0.9$  para Belém. Como mencionamos anteriormente o valores de  $q < 1$  estão relacionado a um crescimento subexponencial na fase inicial da epidemia. Os valores de  $q$  obtidos para essas duas capitais sugerem que, em maior (Recife) e menor (Belém) graus, ambas capitais conseguiram frear o crescimento exponencial inicial do número de óbitos adotando medidas de isolamento social no início da epidemia.

Já na fase final das respectivas curvas epidêmicas, o que diferencia as duas capitais acima é o quão rápido as mesmas se aproximam do platô (fim da epidemia). Recife apresenta um parâmetro  $p$  próximo de 1 (ver figura 2), o que sugere uma saturação quase exponencial, ou seja, relativamente rápida. Belém, por outro lado, tem um valor de  $p$  próximo de três, sugerindo que essa saturação ocorre de forma bem mais lenta (polinomial).

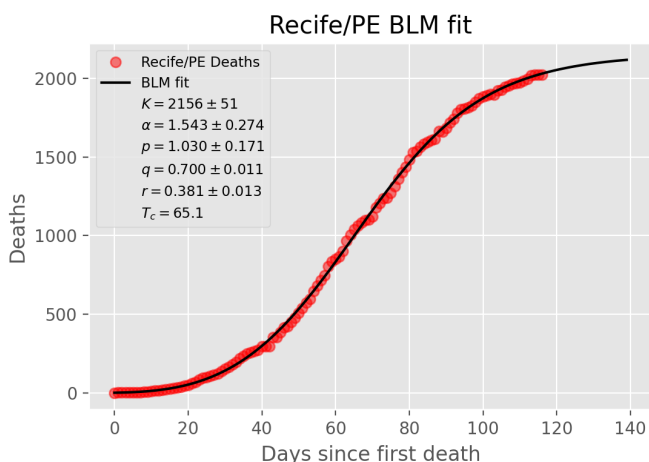


Figura 2: Ajuste pelo modelo logístico beta (BLM) do número cumulativo de óbitos na cidade de Recife. Os círculos vermelhos representam os dados e a curva preta é o ajuste pelo modelo.

Foi possível identificar ainda que para as capitais Goiânia, Belo Horizonte, Campo Grande, João Pessoa, Curitiba, Porto Alegre, Florianópolis e Brasília (DF), a rotina executada no Modinterv retornou como melhor ajuste aos dados o modelo  $q$ -exponencial, indicando que em tais locais a epidemia ou ainda se encontra em sua fase inicial ou o relaxamento de medidas de distanciamento social causaram uma mudança de tendência à saturação. Os ajustes para os dados dessas capitais podem ser vistos nos painéis das figuras, divididas por região mostradas no apêndice, onde é possível observar também uma estimativa para o tempo de dobramento,  $t_d$ , que é o tempo necessário, a partir da data da presente análise, para que o número de óbitos dobre.

Para as capitais Rio Branco, Maceió, Manaus, Macapá, Salvador, Fortaleza, Vitória, São Luís, Cuiabá, Teresina, Rio de Janeiro, Natal, Porto Velho, Boa Vista, Aracaju, São Paulo e Palmas, o modelo que melhor ajustou os dados foi o modelo de Richards (RM), o que indica que as curvas acumuladas de óbitos dessas localidades já passaram, ou estão próximas, do ponto de inflexão, ponto esse que também corresponde ao pico das curvas diárias.

## DISCUSSÃO

Nessa nota aplicamos três modelos de crescimento para estudar as curvas acumuladas de óbitos atribuídas à Covid-19 das capitais dos estados brasileiros e do Distrito Federal. É possível concluir que das vinte e sete cidades analisadas, em dezenove delas os ajustes mostram que o ponto de inflexão,  $t_c$ , já foi ultrapassado, indicando que a pior fase da epidemia já passou.

Além disso, em Recife e Belém a tendência das respectivas curvas já é de saturação, ou seja, de aproximação ao platô, indicando que (mantida a tendência atual) a epidemia aproxima-se do seu regime final. É importante frisar que mesmo estando essas duas capitais no mesmo regime da epidemia, a saturação em direção ao platô ocorre com velocidades distintas. O Recife apresenta um  $p \approx 1$ , o que indica uma “subida” em direção ao platô de forma quase exponencial; ao passo que o  $p$  de Belém é da ordem de 3, apontando que essa saturação ocorre de forma bem mais lenta. Apesar de ser uma boa notícia para essas duas cidades, é preciso reforçar que o ajuste mostra a tendência atual da evolução da epidemia, que pode ser fortemente influenciada caso medidas efetivas de controle não sejam adotadas e

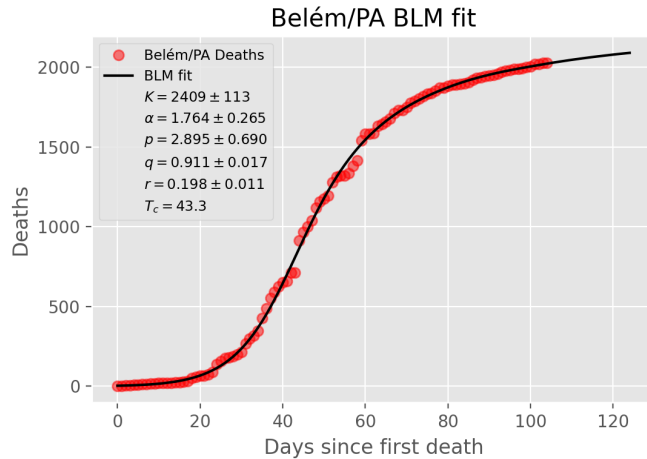


Figura 3: Ajuste pelo modelo logístico beta (BLM) do número cumulativo de óbitos na cidade de Belém. Os círculos vermelhos representam os dados e a curva preta é o ajuste pelo modelo.

mantidas nessa fase. É preciso que se tenha em mente que, mesmo atingindo a fase de saturação, ainda permanece o risco de recrudescimento da curva de contágio, caso as medidas de controle da transmissão do vírus sejam relaxadas.

## AGRADECIMENTOS

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

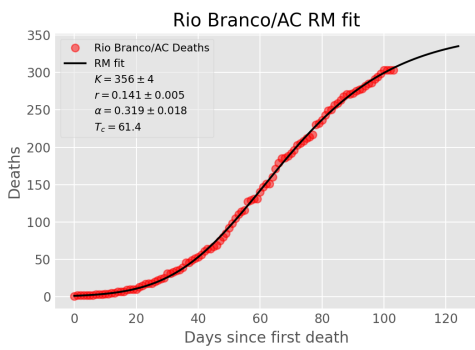
## COLABORAÇÕES

Todos os autores participaram da Conceituação (Igual), Curadoria de dados (Igual), Análise formal (Igual), Investigação (Igual), Metodologia (Igual), Administração de projeto (Igual), Supervisão (Igual), Validação (Igual), Visualização (Igual), Escrita-rascunho original (Igual), Escrita - revisão e edição (Igual).

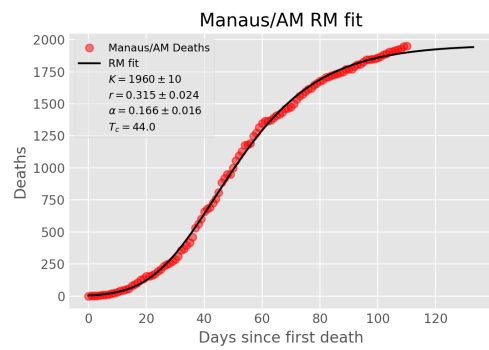
Os autores declaram que não possuem qualquer conflito de interesse

## APÊNDICE: Ajustes via $q$ -exponencial e modelo de Richards

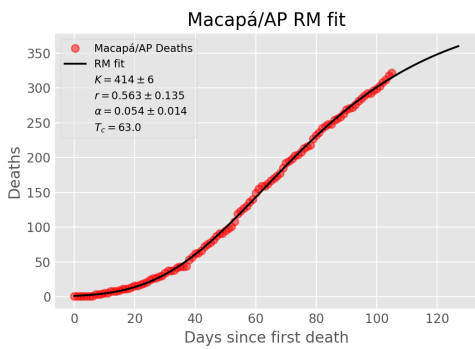
Nos painéis das figuras 4 a 8 são apresentados os melhores ajustes via  $q$ -exponencial e modelo de Richards (MR) para as capitais das regiões Norte (exceto Belém), Nordeste (exceto Recife), Sudeste, Centro-Oeste e Sul, respectivamente.



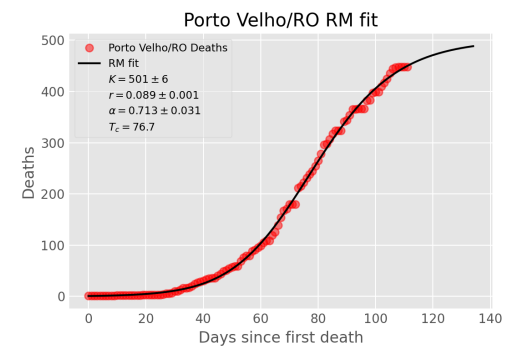
(a)



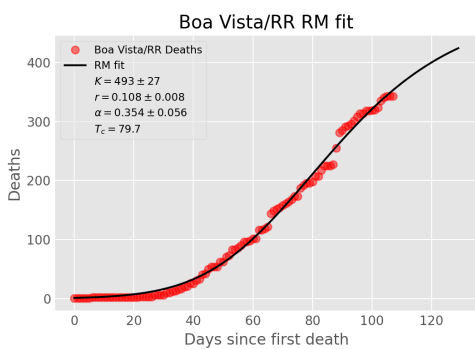
(b)



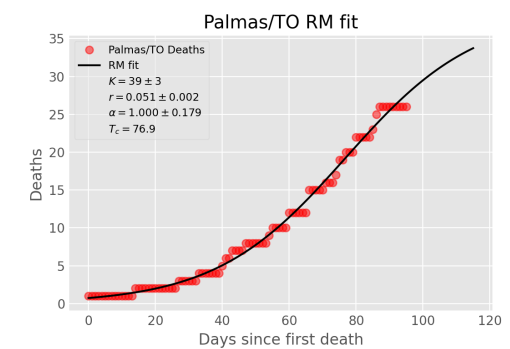
(c)



(d)

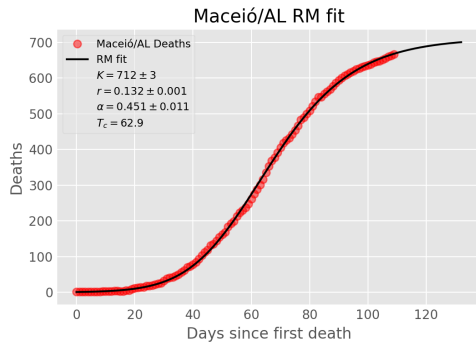


(e)

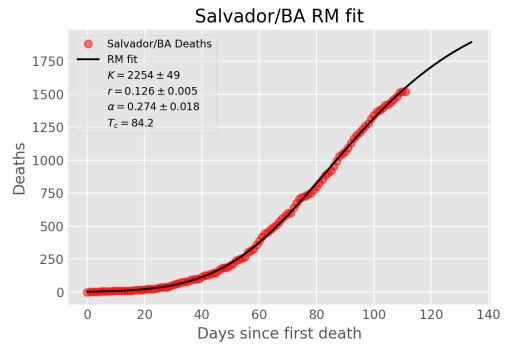


(f)

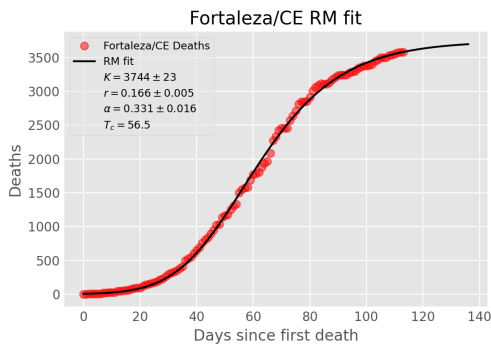
Figura 4: Capitais da região Norte do Brasil, exceto Belém.



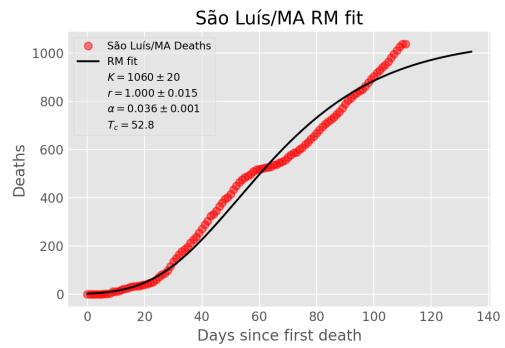
(a)



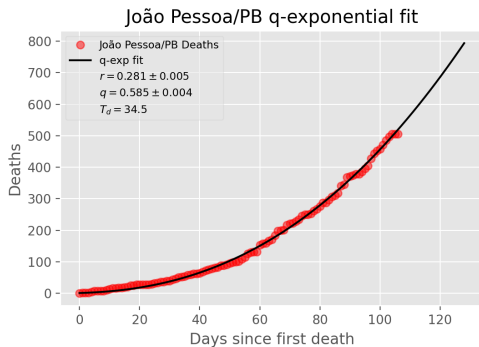
(b)



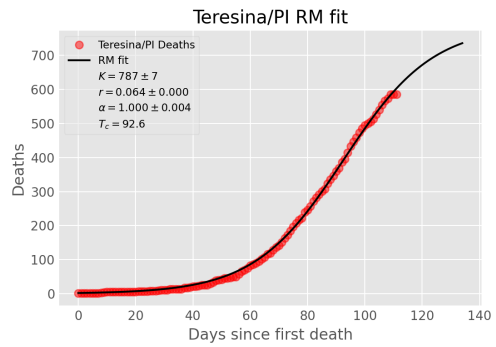
(c)



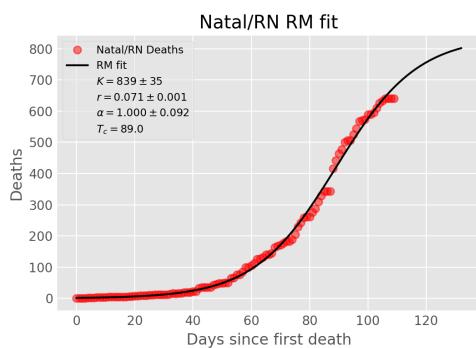
(d)



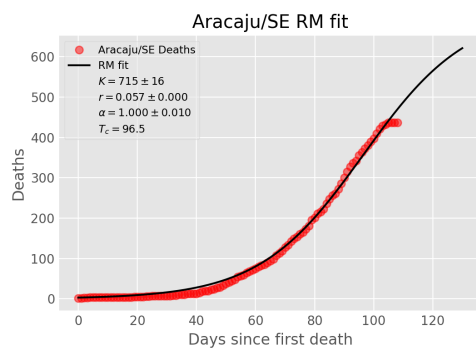
(e)



(f)

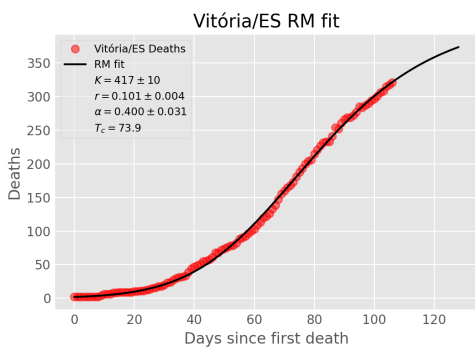


(g)

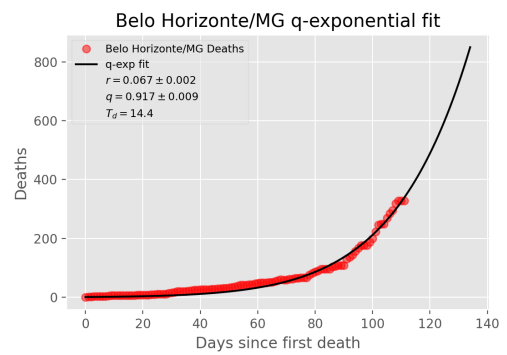


(h)

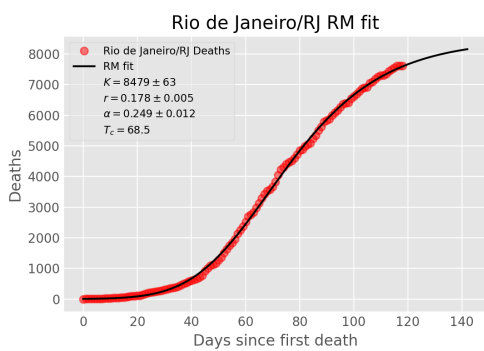
Figura 5: Capitais da região Nordeste do Brasil, exceto Recife.



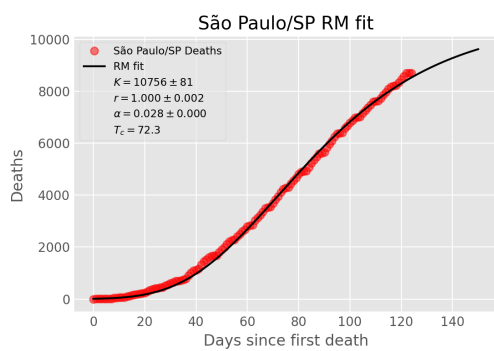
(a)



(b)



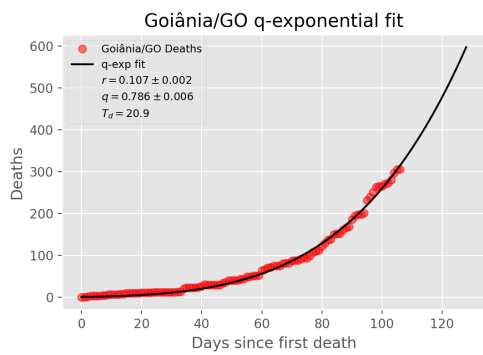
(c)



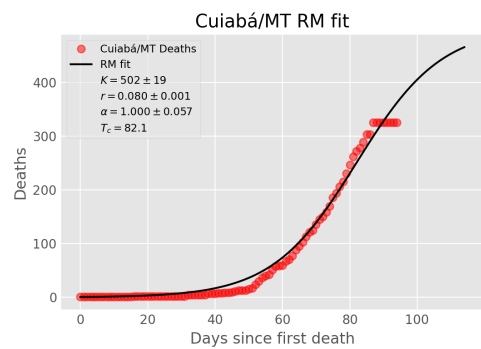
(d)

Figura 6: Capitais da região Sudeste do Brasil.

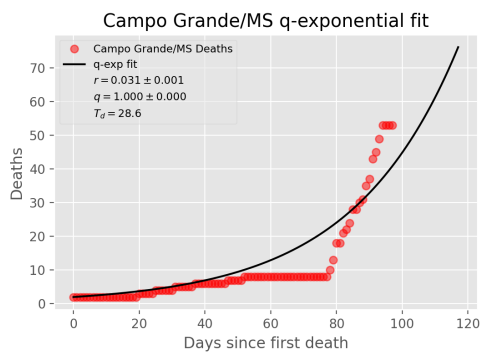




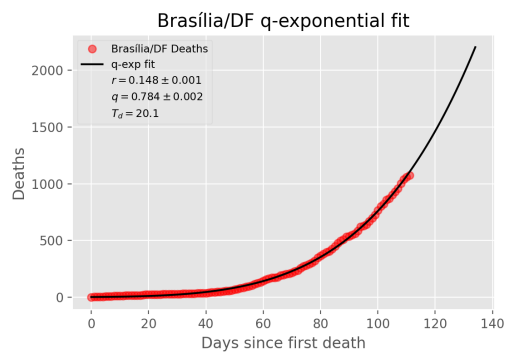
(a)



(b)

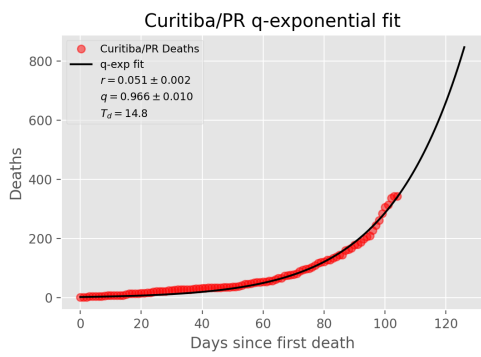


(c)

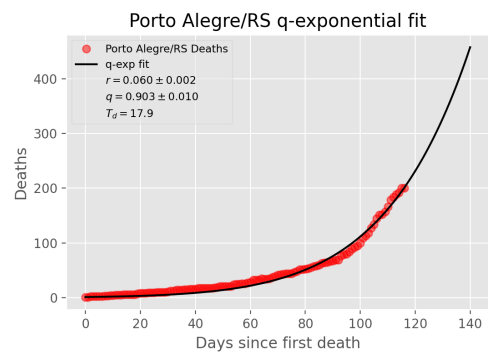


(d)

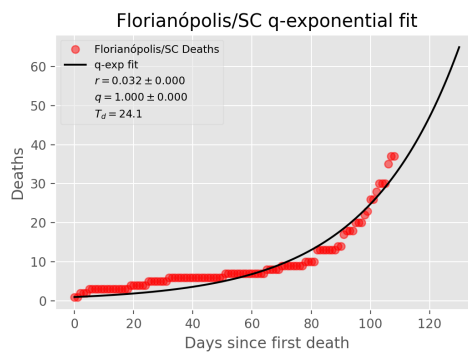
Figura 7: Capitais da região Centro-Oeste do Brasil.



(a)



(b)



(c)

Figura 8: Capitais da região Sul do Brasil.

## Referências

- 1 Worldometer. Worldometer - COVID-19 data. Accessed: 2020-07-19. <<https://www.worldometers.info/coronavirus/>>, 2020
- 2 Giovani L. Vasconcelos, Antônio M.S. Macêdo, Raydonal Ospina, Francisco A.G. Almeida, Gerson C. Duarte-Filho, Arthur A. Brum, and Inês C.L. Souza. Modelling fatality curves of COVID-19 and the effectiveness of intervention strategies. *PeerJ*, 8:e9421, June 2020.
- 3 Giovani L. Vasconcelos, Arthur A. Brum, Gerson C. Duarte-Filho, Raydonal Ospina, FranciscoA. G. Almeida and Antônio M. S. Macêdo. Panorama da covid-19 no nordeste brasileiro: análises e previsões via modelos de crescimento *Scielo Preprints* <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.987>, 2020.
- 4 Giovani 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* <https://doi.org/10.1101/2020.07.12.20152140> , 2020.
- 5 Arthur A. Brum, Gerson C. Duarte-Filho, and Giovani L. Vasconcelos. Application Modinterv Covid-19. Available at: <[fisica.ufpr.br/modinterv](https://fisica.ufpr.br/modinterv)>, 2020.