

Propagação da COVID-19 em redes *mundo-pequeno* de cidades

Cassio de Lima Quiroga¹, Wellington de L. Barreto², Pedro H. T. Schimit³
Universidade Nove de Julho, São Paulo, SP

Este artigo propõe um modelo matemático epidemiológico baseado em uma estrutura de redes de cidades para avaliar como a movimentação de indivíduos entre cidades influencia na dinâmica da COVID-19 na população. O objetivo é estudar o impacto da variação da taxa de viajantes entre estas cidades, bem como a topologia da rede e suas influências na dinâmica do espalhamento da doença. As cidades da rede são modeladas por um autômato celular (AC) a partir do modelo apresentado em [1], e a rede será construída a partir do modelo mundo-pequeno de Watts e Strogatz [2].

No modelo apresentado em [1], foi considerado uma variação do modelo Suscetível-Infetado-Recuperado de Kermack-McKendrick. Aqui, para aproximar o modelo à COVID-19, usa-se um modelo SAIR, em que os dois estados infectados são relativos ao infectados assintomáticos e sintomáticos. Dessa forma, de acordo com a regra da infecção do modelo de [1], quando um indivíduo suscetível é infectado, usa-se uma probabilidade de $P_S = 0,2$ de se tornar sintomático, ou se torna assintomático.

Assim, o ciclo de um indivíduo começa como suscetível, podendo se infectar caso tenha contato com infectados (de acordo com [1]). A função de probabilidade de infecção é dada por $P_I = 1 - e^{-kv}$, em que k é um parâmetro de infectividade da doença, e v a quantidade de vizinhos infectados na vizinhança da célula no autômato (vizinhança definida em [1]). Uma vez infectado, sorteia-se um valor para definir se será assintomático ou sintomático. Quando infectado, um infectado assintomático (sintomático) tem uma probabilidade de se curar da doença de P_{CA} (P_{CS}) se tornando um recuperado, ou de morrer de P_{DA} (P_{DS}). Indivíduos recuperados podem morrer por outras causa com probabilidade P_N . Indivíduos que morrem são substituídos por suscetíveis para manter a população constante.

Neste modelo, cada nó da rede representa uma cidade, e as arestas representam possibilidade de viagens dos indivíduos entre as cidades (nós). Considera-se que θ indivíduos são trocados entre cidades que se conectam por arestas. A rede é criada com o uso da biblioteca em C do iGraph [3] para montar uma rede mundo-pequeno. As entradas são o tamanho da rede Φ , a quantidade de conexões iniciais com vizinhos m_{sw} e a probabilidade de reconexão de cada aresta p_{sw} .

Cada cidade é um autômato celular baseado em um reticulado $n \times n$, com $n \times n = N$ células. Cada célula representa um indivíduo que pode estar em um dos estados considerados da COVID-19 (Suscetível, Infectado Assintomático, Infectado Sintomático e Recuperado). Como condição inicial, 0,5% dos indivíduos de uma cidade aleatória da rede é colocada como infectados, com todas as outras cidades constituídas apenas por suscetíveis. Mais detalhes do modelo em AC em [1]. Em um passo de tempo, θ indivíduos por aresta de cidade troca de cidade, fica na cidade vizinha durante o passo de tempo, e volta para a cidade original para a realização dos testes para transição de estados da doença.

A Figura 1 contém a evolução temporal resultante de uma única simulação da concentração de indivíduos infectados assintomáticos e sintomáticos para cada cidade de uma rede com $\Phi = 16$

¹cassio@quiroga.net.br

²wellington.barreto@uni9.edu.br

³schimit@uni9.pro.br

idades. Como condição inicial, uma das cidades da rede foi escolhida aleatoriamente para conter 0,5% de indivíduos infectados, com o restante da população de suscetíveis. As outras cidades são compostas apenas por suscetíveis no início da simulação. Para gerar essa rede, foram usados $m_{sw} = 4$ e $p_{sw} = 0,2$, que resultou em uma rede com coeficiente de agregação igual a 0,38 [4]. A quantidade de viajantes por aresta de cidades foi definido como $\theta = 5$. Os parâmetros da doença foram $k = 0,1$, $P_{CA} = 1/14$, $P_{CS} = 1/21$, $P_{DA} = 0$, e $P_{DS} = 0,05$. Indivíduos recuperados podem morrer por outras causa com probabilidade P_N .

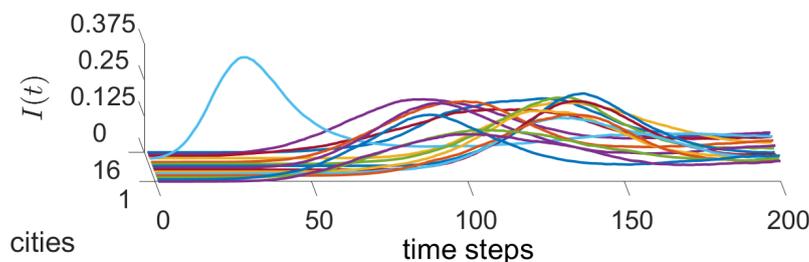


Figura 1: Evolução temporal da concentração de infectados (sintomáticos + assintomáticos) nas $\Phi = 16$ cidades da rede.

Note que o pico de infectados ocorre inicialmente na cidade onde o surto iniciou. Depois, vai se espalhando pela rede e todas as cidades tem surtos da doença. O trabalho será expandido para avaliar como as variáveis da topologia da rede e das viagens entre cidades influenciam na dinâmica da doença nas cidades e na rede como um todo.

Agradecimentos

WLB agradece o apoio financeiro da CAPES por meio do processo #88887.690818/2022-00.

Referências

- [1] P. H. T. Schimit e L. H. A. Monteiro. “On the basic reproduction number and the topological properties of the contact network: An epidemiological study in mainly locally connected cellular automata”. Em: **Ecological Modelling** 220.7 (2009), pp. 1034–1042.
- [2] D. J. Watts e S. H. Strogatz. “Collective dynamics of ‘small-world’ networks”. Em: **Nature** 393 (June 1998), pp. 440–442. ISSN: 0028-0836.
- [3] G. Csardi e T. Nepusz. “The igraph software package for complex network research”. Em: **InterJournal, Complex Systems** (2006), p. 1695.
- [4] S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez e D. U. Hwang. “Complex networks: Structure and dynamics”. Em: **Physics Reports** 424.4-5 (2006), pp. 175–308. ISSN: 03701573.