

Artigo Técnico

# Índice de vulnerabilidade à COVID-19: uma aplicação para a cidade de Fortaleza (CE), Brasil

*Vulnerability index to COVID-19: Fortaleza, Brazil study case*

Tais Maria Carvalho<sup>1</sup> , Samíria Maria Oliveira da Silva<sup>1\*</sup> , Carla Beatriz Araújo<sup>1</sup> ,  
Renata Frota<sup>1</sup> , Louise Caroline Xavier<sup>1</sup> , Bárbara Bezerra<sup>1</sup> , Eduarda Almeida<sup>1</sup> ,  
Francisco de Assis de Souza Filho<sup>1</sup> 

## RESUMO

## ABSTRACT

O estudo propôs a elaboração de um índice de vulnerabilidade à propagação da COVID-19 utilizando análise multivariada associada à análise geoespacial. O método empregado considerou a vulnerabilidade como uma combinação de três fatores: exposição, susceptibilidade e capacidade de resposta. A metodologia foi composta de seis etapas: seleção e agrupamento de variáveis; definição dos indicadores; normalização; atribuição de pesos via análise dos componentes principais; estimativa e normalização do índice; e classificação por meio das técnicas Jenks, Kmeans, quantis e clusterização hierárquica (Hclust). Foi realizada uma caracterização da exposição da cidade de Fortaleza, Brasil, à COVID-19 por meio da densidade populacional, da quantidade de habitações subnormais e precárias, da porcentagem de idosos por residência e da proximidade a terminais de ônibus. O estudo procurou sobrepor fatores socioeconômicos e índices de abastecimento público e de esgotamento sanitário, para a classificação de setores censitários em cinco níveis de vulnerabilidade. Estes apresentaram, em sua maioria, classe de alta (Jenks e quantis) e moderada (K-means e Hclust) vulnerabilidade. As regiões de maior vulnerabilidade estão localizadas no sul e no oeste da cidade, onde há maior concentração de aglomerados subnormais. Os resultados podem auxiliar no desenvolvimento de estratégias de enfrentamento direcionadas para os grupos mais expostos aos riscos associados à COVID-19, assim como na preparação para futuras crises de saúde pública. A metodologia pode ser replicada para outras cidades e serve como ferramenta para os gestores públicos.

The study proposes an index of vulnerability to the spread of COVID-19 using multivariate and geospatial analyses. Vulnerability was considered as a combination of exposure, susceptibility, and responsiveness of the population. The methodology consisted of six steps: selection and grouping of variables; definition of indicators; normalization of the variables; weight calculation using principal component analysis; index calculation and normalization; and classification using Jenks, Kmeans, Quantile, and Hclust techniques. The exposure of Fortaleza, Brazil, to COVID-19 was assessed by means of population density, number of subnormal and precarious housing, percentage of aged people per residence and proximity to bus terminals. The study integrates factors related to socioeconomic characteristics, public water supply and sanitation for the classification of census tracts in five levels of vulnerability. Most of them present high (Jenks and Quantile) and moderate (K-means and Hclust) vulnerability. The most vulnerable regions are in the South and West Zones of the city, where many subnormal agglomerates are located. The results can assist the development of coping strategies for the groups most exposed to the risks associated with COVID-19, as well as in the preparation for future public health crises. The methodology can be replicated in other cities and can be useful for public managers.

**Keywords:** vulnerability; COVID-19; urban inequalities.

**Palavras-chave:** vulnerabilidade; Covid-19; desigualdades urbanas.

## INTRODUÇÃO

A rápida disseminação do coronavírus 2 da síndrome respiratória aguda grave (SARS-CoV-2), agente etiológico da doença do novo coronavírus 2019 (COVID-19), obrigou governos locais a implementarem uma série de intervenções para minimizar a taxa de contágio, de forma a resguardar seus respectivos sistemas de saúde de um possível colapso.

Dentre as medidas tomadas, estão o aumento do número de testes de diagnóstico, a implantação de medidas de higiene coletiva, o distanciamento social e o isolamento rápido de casos suspeitos e casos confirmados. Além disso, incluem-se medidas de restrições à mobilidade, como o “*cordon sanitaire*” imposto à cidade de Wuhan, China, que envolve o controle de fronteiras e a restrição de locomoção interestadual e intermunicipal. Essas estratégias são fundamentais devido à condição

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará - Fortaleza (CE), Brasil.

\*Autora correspondente: samiriamaria@gmail.com

**Conflitos de interesse:** os autores declaram não haver conflito de interesses.

**Financiamento:** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Projeto ALOCA, Nº 420882/2018-9), Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

**Recebido:** 07/07/2020 - **Aceito:** 13/08/2020 - **Reg. ABES:** 20200242

de transmissão comunitária do vírus. O contágio ocorre por vias respiratórias, por meio do contato com gotículas de saliva no ar ou pelo contato físico com secreções contaminadas, além de poder ser transmitido por pessoas assintomáticas, o que dificulta a detecção dos infectados.

Suspeitas da transmissibilidade pela respiração por intermédio de aerossóis no ar (VAN DOREMALEN *et al.*, 2020) e pela via feco-oral (GU; HAN; WANG, 2020) evidenciam as incertezas relacionadas à rápida expansão do vírus. Além disso, outro estudo conduzido em Wuhan (LIU *et al.*, 2020) aponta que a limpeza feita em superfícies consideradas infectadas também apresenta risco devido à ressuspensão do RNA viral. Para vários pesquisadores, a detecção desse RNA em diferentes momentos da infecção sugere que os vírus são secretados continuamente, logo, provavelmente infectantes.

Ademais, estudos recentes (HOLSHUE *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2020) apontam a reprodução viral de SARS-CoV-2 no aparato gastrointestinal de pacientes por meio de exames fecais, que resultaram positivos por até 11,2 dias após a negativa de exames respiratórios. Houve detecção do RNA do vírus em águas residuárias nas cidades de Kaatsheuvel e Tilburg, Holanda, e em cidades dos Estados Unidos e da Suécia.

Em meio a essa conjuntura, ferramentas que auxiliem os gestores no processo de tomada de decisão a respeito das ações a serem implementadas, a estabelecer prioridades e a elaborar planejamentos para emergências tornam-se imprescindíveis. Segundo Paphomakul-Köhle (2019), os tomadores de decisão precisam, principalmente, de dois tipos de informações: sobre o perigo (magnitude esperada e frequência, tempo de ocorrência, extensão espacial) e sobre os elementos em risco. Os índices de vulnerabilidade têm sido aplicados para subsidiar a geração dessas informações.

A construção de índices envolve várias etapas, incluindo a seleção dos indicadores, a normalização, a ponderação e a classificação. A ponderação do indicador é a etapa mais sensível para essa construção, conforme discutido por Becker *et al.* (2017). Ela pode basear-se em análises estatísticas (como Pesos Iguais e Análise de Componentes Principais, em inglês: *Principal Components Analysis* — PCA) ou abordagens participativas (como o Analytic Hierarchy Process — AHP — e a Budget Allocation — BAL). As vantagens e desvantagens dessas técnicas estão relatadas em Gan *et al.* (2017).

Dentre as técnicas existentes, Asadzadeh, Kotter e Zebardast (2015) relatam que a PCA tem sido a mais utilizada. Ela é uma técnica de estatística multivariada que se baseia em redistribuir a variação observada nos eixos dimensionais originais, de forma a obter-se um conjunto de eixos ortogonais não correlacionados. Cada componente principal trata-se de uma combinação linear de todas as variáveis originais e é obtido a fim de reter o máximo de informação em termos da variância total contida nos dados (JOHNSON; WICHERN, 1998).

A aplicação do índice foi realizada para a cidade de Fortaleza, localizada no estado do Ceará, Brasil. No último Boletim Epidemiológico (INTEGRASUS, 2020), em Fortaleza, até o dia 06 de julho de 2020, existiam 37.037 casos confirmados para a COVID-19, 3.377 óbitos acumulados e 32.368 casos em investigação. Ao mesmo tempo, a cidade apresenta elevada desigualdade social e econômica, de forma que existem regiões completamente desprovidas de serviços de saneamento básico e de equipamentos de saúde.

O estudo propôs a elaboração de um índice de vulnerabilidade à propagação da COVID-19 (VIC) utilizando análise multivariada associada à análise geoespacial. O método pode ser aplicado às escalas regional e local usando dados secundários. O VIC foi construído considerando três dimensões: exposição,

susceptibilidade e capacidade de resposta. O índice fornece uma análise quantitativa e uma visualização georreferenciada da vulnerabilidade, de maneira que tomadores de decisão, profissionais da área de saúde e não especialistas possam ter uma visão clara da possibilidade de disseminação do novo coronavírus.

## METODOLOGIA

### Área de aplicação

A cidade de Fortaleza, localizada na Região Nordeste do Brasil, foi utilizada como área de aplicação. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), Fortaleza tem população de 2.643.247 habitantes e área de 312.407 km<sup>2</sup>.

Fortaleza apresenta Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* de R\$ 17.359,00. No ano de 2010, obteve um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,754, sendo superior ao IDH médio do estado do Ceará, equivalente a 0,682 (IPEA, 2016).

Fortaleza está inserida na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), compartilhando o abastecimento de água com os outros municípios dessa região. Esse abastecimento é gerado por águas locais e águas inter-regionais oriundas de transferências hídricas.

Conforme Fortaleza (2014), o Sistema de Esgotamento Sanitário apresenta duas formas de funcionamento:

- Integrado: o esgoto é conduzido até a Estação de Pré-Condicionamento, segue para o emissário submarino, quando, por fim, é lançado ao oceano;
- Isolado: o processo de coleta, tratamento e disposição se concentra em um mesmo local, como nos casos da imensa maioria dos conjuntos habitacionais dos bairros periféricos.

### Estratégia metodológica

A vulnerabilidade à COVID-19 foi considerada como uma combinação da exposição, da susceptibilidade e da capacidade de resposta conforme descrito por Birkmann (2013) e De Léon (2013):

- Exposição: descreve a presença de pessoas, meios de subsistência, serviços ambientais, infraestruturas ou outros itens valiosos em locais que poderiam ser adversamente afetados pelo perigo;
- Susceptibilidade: relacionada às variáveis que descrevem as deficiências do sistema em lidar com o perigo;
- Capacidade de resposta: refere-se às variáveis existentes (humanas, físicas, institucionais etc.) para lidar com o perigo.

Para a construção do índice, foram considerados indicadores socioeconômicos e demográficos, condições de infraestrutura, saneamento e abastecimento de água.

### Seleção e normalização dos indicadores

Nesta etapa, realizou-se uma pesquisa explanatória para coleta de variáveis nos bancos de dados do IBGE (2010) e do Instituto de Planejamento de Fortaleza (IPLANFOR, 2020). A seleção inicial das variáveis se deu de forma indutiva com base na expertise de especialistas (Quadro 1). No Brasil, dados confiáveis de variáveis socioeconômicas foram coletados no Censo Demográfico de 2010, portanto, esse ano foi utilizado como referência para a aplicação do índice.

**Quadro 1 - Variáveis pré-selecionadas para compor o índice de vulnerabilidade à propagação da COVID-19.**

Sigla	Variável
Exposição	
PID	Porcentagem de idosos por residência
TERM	Proximidade a terminal de ônibus
DPOP	Densidade populacional
HABSUB	Densidade de habitações subnormais por setor
Susceptibilidade	
SBAN	Domicílios particulares permanentes sem banheiro de uso exclusivo dos moradores e nem sanitário
ESGCEU	% de domicílios onde existem esgotos a céu aberto
LIXLOG	% de domicílios onde existe lixo acumulado nos logradouros
BANR	Domicílios particulares permanentes, com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário e esgotamento sanitário via rio, lago ou mar
Capacidade de resposta	
ABRED	Domicílios particulares permanentes com abastecimento de água da rede geral
ABPC	Domicílios particulares permanentes com abastecimento de água de poço ou nascente na propriedade
BAN	Domicílios particulares permanentes com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário
CLIXO	Domicílios particulares permanentes com lixo coletado por serviço de limpeza
DAB	Densidade da rede de abastecimento
DESG	Densidade da rede coletora de esgoto
HOSP	Proximidade a hospital com atendimento
RENDA	Renda mensal por residência

Fonte: elaboração própria.

A fim de evitar a redundância entre as informações, aplicou-se a correlação de Spearman. A técnica foi utilizada no intuito de estimar a correlação entre as variáveis, uma vez que permite a avaliação das relações monotônicas entre elas, sejam lineares ou não. O coeficiente de Spearman ( $r_s$ ) é apropriado para variáveis ordinais contínuas e discretas, podendo ser calculado pela Equação 1.

$$r_s = \frac{\text{cov}(rg_X, rg_Y)}{\sigma_{rg_X} \sigma_{rg_Y}} \quad (1)$$

Em que  $cov$  representa a covariância das variáveis de classificação;  $\sigma_{rg_X}$  e  $\sigma_{rg_Y}$  correspondem aos desvios padrões das variáveis de classificação. Para a classificação dos valores de correlação, adotou-se a escala recomendada por Hopkins (2002): trivial ( $rs < 0,1$ ); pequena ( $0,1 < rs < 0,3$ ); moderada ( $0,3 < rs < 0,5$ ); grande ( $0,5 < rs < 0,7$ ); muito grande ( $0,7 < rs < 0,9$ ); quase perfeita ( $rs > 0,9$ ). Como critério de exclusão, adotaram-se valores de correlação muito grande ou quase perfeita ( $rs > 0,7$ ).

Devido à variação de escala e unidade das variáveis consideradas, estas foram normalizadas por meio do método mín-máx (OECD, 2008), a fim de serem transformadas para um intervalo entre 0 e 1. A Equação 2 descreve o procedimento utilizado.

$$X_{norm} = \frac{X - \text{Min}(X)}{\text{Max}(X) - \text{Min}(X)} \quad (2)$$

Em que:

$X_{norm}$  = variável normalizada;

$X$  = variável original;

Mín e Máx = valores mínimo e máximo da variável.

### Atribuição de pesos e cálculo do índice

A atribuição de pesos foi realizada com base no método PCA. Segundo Gan *et al.* (2017), esse método visa reduzir a dimensionalidade dos dados sem a perda de informações significativas e utiliza a estrutura de correlação do conjunto de dados originais. Conforme a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2008), o peso de cada dimensão pode ser calculado a partir das cargas fatoriais que expressam a razão da variância global do indicador.

A PCA foi aplicada por intermédio da linguagem de programação R, por meio da função *prcomp*. Cada componente principal está associado a um vetor próprio que fornece o peso aos indicadores. Contudo, cada indicador tem, inicialmente, mais de um peso, visto que o método gera mais de um componente.

Assim, um método de agregação dos componentes principais (PÉREZ-FOGUET; GINÉ GARRIGA, 2011) foi utilizado para calcular o peso de cada indicador (Equação 3). Esta equação foi utilizada para os componentes que apresentaram o autovalor maior que 1 (critério de corte).

$$w_i = \sum_{k=1}^n \left( a_{k,i} \frac{\sqrt{\lambda_k}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\lambda_j}} \right) \quad (3)$$

Em que:

$w_i$  = peso final usado para o indicador  $i$ ;

$k$  = número de componentes principais;

$\alpha_{kii}$  = autovetores, que variam de 1 a  $k$  e de 1 a  $i$  (indicadores);

$\lambda_k$  = valores dos componentes principais;

$\sum_{j=1}^n \sqrt{\lambda_j}$  = a soma dos valores adotados  $j$  após a aplicação dos critérios de seleção.

Em seguida, foram aplicados o módulo e a normalização dos valores dos pesos (Equação 4). O módulo (Equação 4) e a normalização dos valores foram aplicados na sequência do procedimento metodológico.

$$w_{i,norm} = \frac{|w_i|}{\sum_{i=1}^n |w_i|} \quad (4)$$

Em que:

$n$  = número de indicadores;

$w_i$  = o peso de cada indicador.

Os pesos foram aplicados a cada indicador e o cálculo do índice foi realizado conforme a Equação 5:

$$VIC = E + S - C \quad (5)$$

Em que:

$E$  = exposição;

$S$  = susceptibilidade;

$C$  = capacidade de resposta.

Os valores do índice foram normalizados ( $VIC_{i,norm}$ ) para que eles variem em um intervalo entre 0 e 1 (Equação 6).

$$VIC_{i,norm} = \frac{VIC_i - \min(VIC)}{(\max(VIC) - \min(VIC))} \quad (6)$$

## Classificação

A classificação foi realizada por meio de quatro métodos diferentes (K-means, Jenks, Quantil e HClust), no intuito de se evitar o viés metodológico. Para essa análise, foi utilizado o pacote *classInt* (BIVAND, 2020).

O K-means realiza a classificação dentro de múltiplos grupos de forma que a variação intraclasse seja minimizada pela soma dos quadrados das distâncias euclidianas entre os itens e seus centroides. O Método Quantil atribui a cada classe o mesmo número de elementos, não havendo classes vazias ou disparidades na quantidade de elementos. O método Jenks visa otimizar a diferença de valores entre as classes e maximizar a semelhança de valores nas mesmas classes, com base no índice de melhor ajuste de variância (RAMOS *et al.*, 2016). Já HClust utiliza o método de ligação completa para classificação, em que a medida de similaridade entre as classes é definida pela distância máxima entre seus componentes individuais.

Os métodos de classificação foram utilizados para dividir os setores censitários em cinco classes de vulnerabilidade: baixa, moderada, alta, muito alta ou extrema.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo foi realizado para o nível espacial de setores censitários. Essa divisão foi priorizada por corresponder à unidade territorial delimitada pelo IBGE para coleta de dados do Censo Demográfico de 2010. Fortaleza contém 3.043 setores censitários. Entretanto, essa análise contemplou apenas 2.563 desses setores, para os quais existiam informações disponíveis.

### Caracterização da exposição de Fortaleza à COVID-19

Inicialmente, foram desenvolvidos mapas indicativos de exposição à COVID-19 na cidade de Fortaleza. Para tal, foram analisados: densidade populacional, habitações subnormais e precárias, porcentagem de idosos por residência e localização dos terminais de ônibus. Na Figura 1A, verifica-se que Fortaleza tem regiões altamente adensadas (mais da metade da cidade tem densidade demográfica acima 15.839 hab/km<sup>2</sup>). Ademais, diversas regiões da cidade (Figura 1B) apresentam residências habitadas por idosos (acima de 60 anos), sendo a população mais vulnerável ao vírus e mais propensa a desenvolver os sintomas mais graves da doença.

Vale mencionar a redefinição dos resultados dos primeiros estudos publicados no início da pandemia na China, que apontavam que a maior parte dos casos graves ocorria em pessoas entre 45 e 65 anos. Editorial recente da revista científica *Lancet* (THE LANCET, 2020) alerta que grupos de risco podem variar dinamicamente, a depender de respostas políticas. Perdas de fontes de renda, falta de acesso a políticas públicas, problemas de saúde físicos e mentais são fatores difíceis de estimar, mas que se relacionam com características intrínsecas de certos grupos socioeconômicos.

Conforme estudo realizado pela Fiocruz e publicado na revista *Social Science & Medicine* (BARBER *et al.*, 2018), esses grupos segregados manifestam a desigualdade econômica tanto racialmente quanto espacialmente e em termos de saúde.

Barber *et al.* (2018) verificaram que bairros economicamente segregados, mais propensos a serem ocupados por negros e pardos, têm 26% mais chances de terem moradores com hipertensão e 50% mais chances de terem moradores com diabetes do que bairros em áreas mais ricas. Por conseguinte, além das pessoas com idade superior a 60 anos, aquelas com problemas cardiovasculares, como os mencionados acima, e doenças respiratórias também são compreendidas como grupos de risco pela comunidade científica.

Para a avaliação da exposição também é importante identificar a proximidade aos terminais de ônibus e agrupamentos de habitações subnormais e precárias (Figura 1C). Regiões de terminais de ônibus um elevado número de pessoas de diferentes regiões da cidade, o que pode potencializar a disseminação do vírus nesses locais. As habitações precárias e subnormais dificultam o isolamento de pessoas contaminadas do restante da família, pois em tais habitações as condições de infraestrutura são mínimas. A isso se soma a dificuldade de seguir as recomendações de distanciamento social e as orientações de higiene pessoal em áreas que apresentam sistemas de saúde frágeis, com populações de classes econômicas mais baixas, densamente povoadas, sem saneamento básico e acesso à água potável.

Por isso, outro aspecto importante foi a identificação das regiões da cidade com maiores deficiências no abastecimento de água e esgotamento sanitário em habitações subnormais (Figuras 1D e 1E). Segundo o Plano Municipal de Saneamento de Fortaleza (FORTALEZA, 2014), a cobertura de abastecimento de água na cidade é de 98,65% e a de esgotamento, de 57,84%.

Conforme os resultados apresentados, poucas habitações não têm abastecimento de água, porém diversas regiões não têm rede de esgotamento sanitário. Observou-se que 4% da área total de Fortaleza tem habitações subnormais e está sem acesso à cobertura de rede de água (Figura 1D). Isso ocorre, em especial, nos bairros Siqueira, Granja Lisboa, Barroso e Jangurussu. Da mesma forma, verificou-se que 42,4% de Fortaleza tem habitações subnormais e sem acesso a esgotamento sanitário (Figura 1E).

### Análise da vulnerabilidade

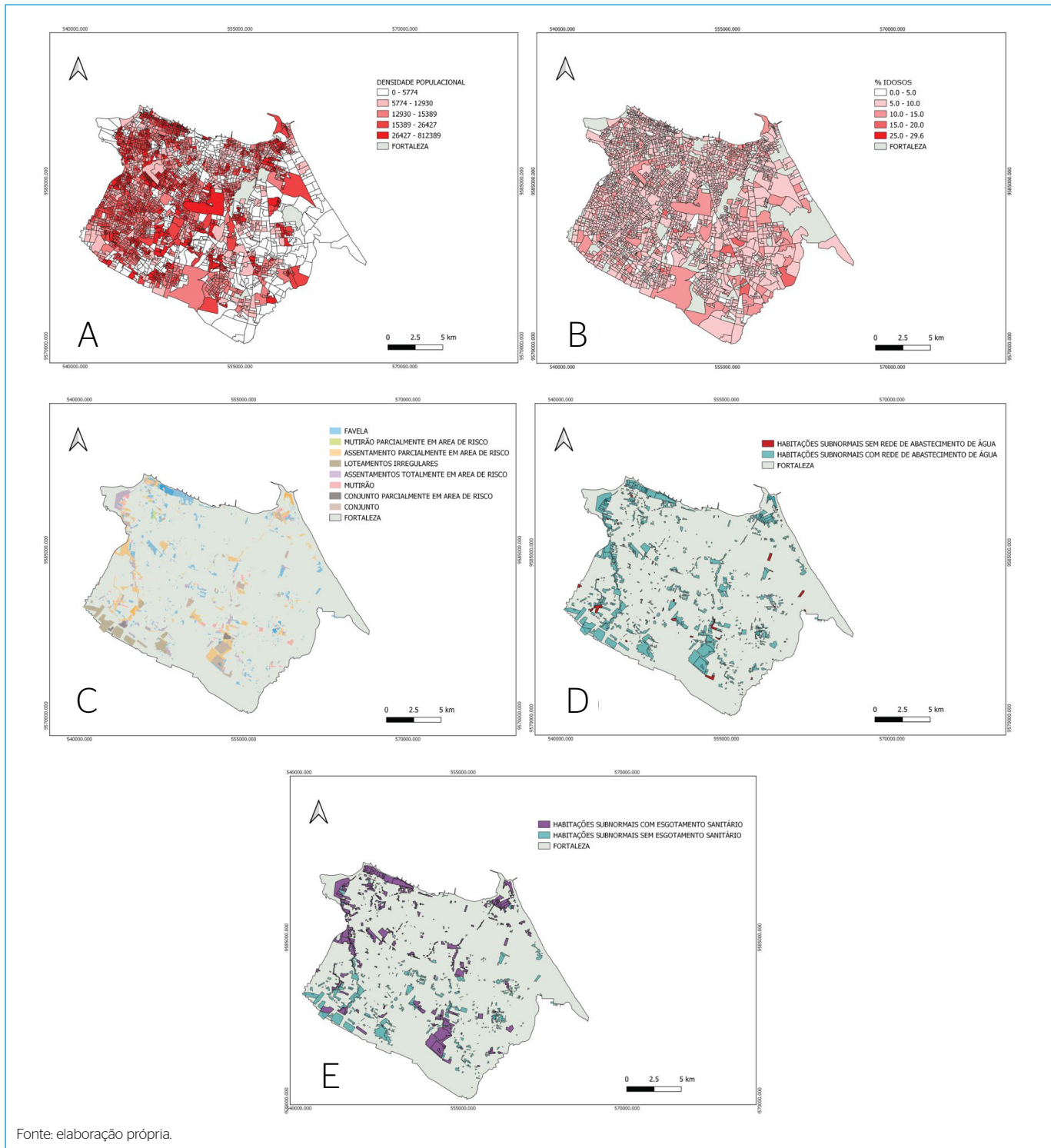
A correlação entre as variáveis exposição, susceptibilidade e capacidade de resposta (Quadro 1) foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Spearman (Figura 2). A partir da análise da matriz de correlação, foram eliminadas duas variáveis: BAN e CLIXO ( $r_s = 0,83407$ ), restando 14 variáveis. Estas foram retiradas devido ao alto valor de correlação ( $r_s > 0,7$ ), sendo consideradas redundantes para a construção do índice.

A PCA resultou em 14 componentes, sendo obtidos os valores médios de desvio padrão, proporção de variância e proporção cumulativa para cada um deles. A Tabela 1 dispõe os 10 primeiros componentes obtidos a partir da PCA.

Foram considerados os componentes com autovalor maior que 1 para o cálculo dos pesos das variáveis. Na análise gráfica dos 10 primeiros componentes principais, a primeira interrupção ocorreu no quarto PC, porém, uma vez que é recomendável incluir também o próximo PC após o intervalo, esse critério condicionou cinco PCs a serem considerados na análise, explicando 54,5% da variância total.

Admitindo-se o critério de corte (autovalores maiores que 1), a aplicação do método de agregação dos componentes principais calculou o peso de cada indicador ( $w_i$ ), conforme a Tabela 2. Os indicadores ainda tiveram seus pesos normalizados ( $W_{i,norm}$ ), para que a soma total dos pesos tivesse valor igual a 1.

Os maiores pesos correspondem às variáveis ABPC, SBAN, ABRED, BANR e TERM, estando as quatro primeiras associadas às condições de saneamento do



**Figura 1** – (A) Densidade populacional, (B) percentual de idosos por residências, (C) habitações subnormais e terminais de ônibus, (D) áreas que apresentam habitações subnormais e ausência de abastecimento público de água e (E) áreas que apresentam habitações subnormais e ausência de esgotamento sanitário público.

setor censitário, implicando na necessidade de adequação estrutural e ampliação do acesso aos serviços de abastecimento e de esgotamento. As variáveis ABPC e ABRED quantificam o acesso ao abastecimento de água por rede geral, poço ou nascente. O acesso à água é fundamental para a adoção das medidas de higiene coletiva, como lavagem cuidadosa das mãos e limpeza doméstica.

Além disso, a sobrevivência do vírus em alguns materiais e superfícies requer maior frequência de limpeza. Assim, o fornecimento de água potável está diretamente relacionado à proteção da saúde dos habitantes e é necessário para assegurar a segurança e maior capacidade de resposta da população diante de uma pandemia.



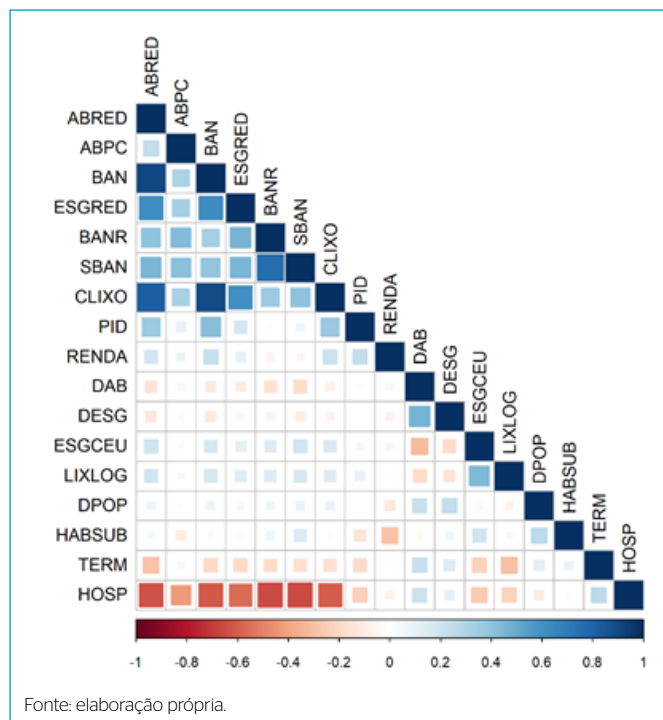


Figura 2 - Correlação de Spearman entre as variáveis do índice.

Assim como o acesso à água potável, a coleta adequada de esgotos e a presença de, no mínimo, um banheiro de uso exclusivo dos residentes são indispensáveis para a garantia da saúde. Esses aspectos, refletidos por meio das variáveis % de domicílios sem banheiro de uso exclusivo dos moradores e nem sanitário (SBAN) e % de domicílios com banheiro e esgotamento sanitário via rio, lago ou mar (BANR), são ainda mais relevantes devido à possibilidade de contágio a partir das fezes de pessoas contaminadas (HOLSHUE et al., 2020; WU et al., 2020). Residentes que não têm acesso a um banheiro ou sanitário, ou cujo lançamento de esgoto é feito a céu aberto, são mais susceptíveis a adquirir a doença e a transmiti-la aos seus familiares.

Por fim, a variável proximidade a terminal de ônibus (TERM) reflete maior probabilidade de existência de aglomerações entre pessoas infectadas e moradores da região. Apesar das medidas de distanciamento social, a redução na frota de veículos tende a resultar em sobrecarga nos terminais de ônibus. Além disso, os terminais estão localizados nas áreas mais socialmente vulneráveis da cidade, onde está concentrada grande parte dos aglomerados subnormais, em que os serviços públicos são insuficientes e a infraestrutura das residências é inadequada.

Os pesos foram atribuídos a cada indicador e o índice VIC foi calculado e normalizado, conforme as Equações 5 e 6. Os valores obtidos foram utilizados na classificação da vulnerabilidade à COVID-19. A Figura 3 apresenta os mapas com a classificação de vulnerabilidade para os setores censitários de Fortaleza. Para cada uma das metodologias de classificação foram atribuídos intervalos por classe e obtidos os valores de setores inseridos em cada uma dessas classes (Tabela 3).

Tabela 1 - Dez primeiros componentes principais obtidos a partir da *Principal Components Analysis*.

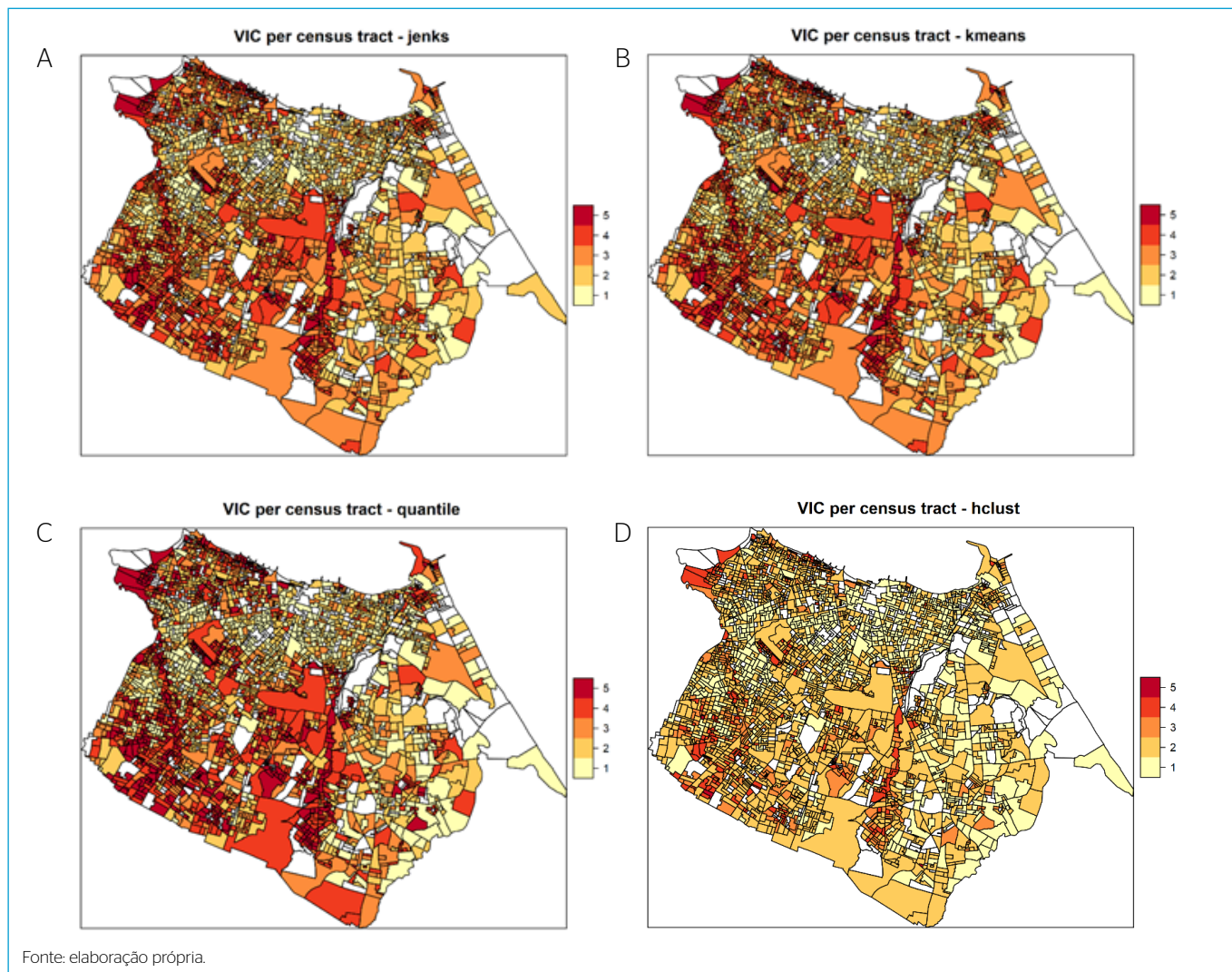
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
Desvio padrão	1,459	1,360	1,159	1,106	1,043	0,987	0,949	0,913	0,880	0,857
Proporção da variância	0,152	0,132	0,096	0,087	0,078	0,070	0,064	0,060	0,055	0,052
Proporção acumulada	0,152	0,284	0,380	0,467	0,545	0,614	0,679	0,738	0,794	0,846

Fonte: elaboração própria.

Tabela 2 - Estimativa dos pesos para os cinco primeiros componentes.

	Autovetores					w <sub>i</sub>	w <sub>i, norm</sub>
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5		
PID	-0,114	0,409	-0,336	0,189	-0,318	-0,020	0,013
TERM	0,394	0,012	0,140	0,242	-0,134	0,144	0,093
DPOP	0,108	-0,176	-0,208	-0,332	0,111	-0,094	0,061
HABSUB	0,150	-0,469	-0,330	-0,020	-0,019	-0,138	0,089
SBAN	-0,137	-0,310	-0,002	0,112	-0,453	-0,159	0,103
ESGCEU	-0,327	-0,259	-0,090	0,278	0,400	-0,034	0,022
LIXLOG	-0,122	-0,126	-0,138	0,607	0,411	0,097	0,063
BANR	-0,122	-0,318	0,048	0,079	-0,418	-0,147	0,095
ABRED	-0,307	0,186	-0,534	-0,019	-0,069	-0,148	0,096
ABPC	0,131	0,134	0,471	0,152	0,141	0,202	0,130
DAB	0,488	0,077	-0,300	0,017	0,076	0,093	0,060
DESG	0,450	-0,054	-0,281	-0,079	0,197	0,061	0,040
HOSP	0,290	0,047	-0,069	0,547	-0,291	0,116	0,075
RENDA	-0,077	0,487	-0,070	0,025	0,075	0,094	0,061

Fonte: elaboração própria.



**Figura 3** – Classificação da Vulnerabilidade à COVID-19: (A) Jenks, (B) K-means, (C) Quantil e (D) Hclust.

**Tabela 3** - Intervalos e quantidade de setores censitários em cada classe de acordo com os quatro métodos de classificação utilizados.

Método	Classe				
	1	2	3	4	5
Jenks	0-0,215 (351)	0,215-0,336 (670)	0,336-0,453 (685)	0,453-0,6 (596)	0,6-1 (261)
K-means	0-0,2195 (369)	0,2195-0,3415 (697)	0,3415-0,4565 (649)	0,4565-0,6015 (590)	0,6015-1 (258)
Quantile	0-0,2544 (513)	0,2544-0,337 (508)	0,337-0,419 (516)	0,419-0,5226 (513)	0,5226-1 (513)
Hclust	0-0,2875 (695)	0,2875-0,5095 (1292)	0,5095-0,634 (389)	0,634-0,851 (180)	0,851-1 (7)

Fonte: elaboração própria.

Dos 2.563 setores censitários contemplados neste estudo, os maiores valores de setores por classe são obtidos na classe 3 — alta (Jenks; Quantil) — e na classe 2 — moderada (K-means; Hclust). A classe 5 (extrema) ainda concentra os menores valores de setores, atingindo a maior média na classificação por Quantil (513).

Em acordo com os quatro métodos de classificação comparados, Jenks (Figura 3A), K-means (Figura 3B), Quantil (Figura 3C) e Hclust (Figura 3D), as classes de vulnerabilidade variaram em cinco níveis:

- 1: baixa;
- 2: moderada;
- 3: alta;
- 4: muito alta;
- 5: extrema.

A Figura 3 permite visualizar as discrepâncias socioeconômicas entre as diversas regiões do município, isso porque o índice de vulnerabilidade calculado aponta para uma projeção de aumento considerável de vulnerabilidade em regiões periféricas e de baixos indicadores sociais, conforme as variáveis consideradas nas análises propostas.

Observou-se que os métodos Jenks, K-means e Quantile apresentaram classificações semelhantes. O método Hclust, apesar de identificar maior quantidade de 327 setores nos níveis 1 a 3, também destaca as áreas periféricas, especialmente nas regiões sul e oeste da cidade, como as mais vulneráveis. Todos os

métodos apresentam alta heterogeneidade na classificação dos setores, o que se deve ao processo de urbanização desordenado e desigual da cidade de Fortaleza.

Uma análise geoespacial dos bairros de Fortaleza em relação ao número de óbitos registrados por bairro até o dia 19 de junho de 2020 permitiu inferir sobre o deslocamento da vulnerabilidade de bairros de alto e muito alto IDH e considerável concentração de poder aquisitivo, para os setores de baixo e muito baixo IDH das Zonas Litorâneas Leste (Vicente Pinzon e Cais do Porto/Serviluz) e Oeste (Grande Pirambu e Barra do Ceará), atingindo um potencial de dispersão relevante para os bairros periféricos. Esses, por conseguinte, concentram uma população dependente do sistema público de saúde, sendo apontados como bairros com maiores déficits em infraestrutura, condições de saneamento e situação de moradia, além de uma população mais vulnerável social e economicamente e com maior incidência de comorbidades (FORTALEZA, 2020).

Esse posicionamento é corroborado pelo Informe Semanal COVID-19, fornecido pela Secretaria Municipal de Saúde (SMS) de Fortaleza, em que a atualização realizada no dia 04 de maio de 2020 mapeou os casos de óbitos segundo bairros no município. O estudo confirma a tendência de distribuição dos casos e de concentração dos óbitos em regiões cujo fornecimento de serviços públicos se dá de forma precária, citadas anteriormente, nas quais verificou-se a continuidade na transmissão de alta intensidade. Destacam-se os bairros Grande Pirambu, Barra do Ceará/Vila Velha/Quintino Cunha, Vicente Pinzon, Cais do Porto-Serviluz e Tauape-Aerolândia (FORTALEZA, 2020). Uma comparação entre o índice desenvolvido e as pesquisas divulgadas pela prefeitura de Fortaleza indicam o estreitamento da tendência à vulnerabilidade nessas regiões.

Uma análise dos números de casos verificados por bairros salienta ainda a capacidade de resposta consideravelmente superior em bairros nobres, que, apesar do quadro alarmante em número de casos confirmados, apresentam inferior número de óbitos, diferentemente dos bairros periféricos e de menores condições de infraestrutura. Assim, a vulnerabilidade mostra relação estreita com as condições de precariedade à qual estão submetidas as diversas regiões do município, enfatizando a necessidade de medidas robustas que atinjam com maior eficiência as regiões apontadas como de alta vulnerabilidade à COVID-19, apresentando potencial de atingirem níveis de extrema vulnerabilidade.

Os resultados obtidos são condizentes com os apontados por Codeço *et al.* (2020), que também associaram o risco de espalhamento do COVID-19 à vulnerabilidade socioeconômica da população. O estudo destacou a alta vulnerabilidade do estado do Ceará e a necessidade de ações urgentes de mitigação. Variáveis associadas ao nível de abastecimento de água e esgotamento sanitário das residências, assim como a porcentagem de habitantes idosos, também foram utilizadas no presente trabalho.

Em outro estudo semelhante, no qual foi calculado um índice de vulnerabilidade à COVID-19 para a cidade do Rio de Janeiro, regiões periféricas e áreas onde estão

localizadas comunidades carentes foram classificadas como mais vulneráveis (DOS SANTOS *et al.*, 2020). A análise também revelou grande heterogeneidade espacial em termos de vulnerabilidade, reflexo da complexa dinâmica social e econômica da cidade, que teve crescimento desigual e desordenado, assim como Fortaleza.

Outro trabalho, realizado na cidade do Rio de Janeiro, no qual foi analisada a distribuição espacial dos casos e óbitos por COVID-19 confirmados, também relevou que as áreas de maior vulnerabilidade social sofreram maior impacto da doença (CAVALCANTE; ABREU, 2020).

## CONCLUSÕES

A evolução da taxa de contágio por COVID-19 na cidade de Fortaleza mostra que, em um primeiro momento, bairros que concentram as maiores rendas *per capita* da cidade apresentaram maiores números de casos confirmados, devido ao regresso de pessoas de países onde já existia contaminação sustentada da doença.

Contudo, não tardou para que a taxa de contágio aumentasse em regiões mais pobres. No momento, o número de infecções é decrescente nas áreas de maior IDH e já existe a disseminação sustentada do vírus em todos os bairros da cidade. O que há de se ressaltar é o fato de o número de mortes ser desproporcional entre as regiões.

O presente estudo procurou sobrepor fatores relacionados com características sociais e econômicas, abastecimento público e esgotamento sanitário para a classificação da vulnerabilidade da população à COVID-19. Os resultados obtidos salientam a necessidade de medidas urgentes e severas nas regiões detectadas, classificadas e mapeadas como imunocomprometidas, que apresentam altos índices de vulnerabilidade.

Os processos metodológicos aplicados para a construção do índice podem ser replicados a outras cidades brasileiras e do mundo, visto que foram utilizadas técnicas consideradas tecnicamente robustas e amplamente difundidas no meio científico.

Para as regiões avaliadas como de alta vulnerabilidade, recomendam-se medidas como quarentena em massa, ampla restrição da mobilidade e realização de sanitização nas regiões mais críticas. Além disso, é fundamental o fornecimento de água potável, sabão, máscaras e monitoramento das infecções diárias em uma cidade que apresenta a maior taxa de infectados por habitante inserida em um país que já tem a maior taxa de contágio do mundo (BHATIA *et al.*, 2020).

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Carvalho, T. M.: Escrita – Revisão e Edição, Análise Formal, Metodologia. Silva, S. M. O.: Conceituação, Supervisão, Validação. Araújo, C. B.: Metodologia, Validação, Escrita – Revisão e Edição; Frota, R.: Escrita – Primeira Redação, Visualização; Xavier, L. C. P. X.: Análise de dados, Visualização. Viana, B.: Escrita – Primeira Redação, Análise de dados. Almeida, E.: Escrita – Primeira Redação. Souza Filho, F. A.: Supervisão, Validação.

## REFERÊNCIAS

ASADZADEH, A.; KOTTER, T.; ZEBARDAST, E. 2015. An augmented approach for measurement of disaster resilience using connective factor analysis and analytic network process (FANP) model. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 14, parte 4, p. 504-518, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.10.002>

BARBER, S.; DIEZ-ROUX, A.V.; CARDOSO, L.; SANTOS, S.; TOSTE, V.; JAMES, S.; BARRETO, S.; SCHMIDT, M.; GIATTI, L.; CHOR, D. At the intersection of place,

race, and health in Brazil: Residential segregation and cardio-metabolic risk factors in the Brazilian Longitudinal Study of Adult Health (ELSA-Brasil). *Social Science & Medicine*, v. 199, p. 67-76, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2017.05.047>

BECKER, W.; SAISANA, M.; PARUOLO, P.; VANDECASTEELE, I. Weights and importance in composite indicators: closing the gap. *Ecological Indicators*, v. 80, p. 12-22, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.056>



- BHATIA, S.; CORI, A.; PARAG, K.V.; MISHRA, S.; COOPER, L.V.; AINSLIE, K.E.C.; BAGUELIN, M.; BHATT, S.; BOONYASIRI, A.; BOYD, O.; CATTARINO, L.; CUCUNUBÁ, Z.; CUOMO-DANNENBURG, G.; DIGHE, A.; DORIGATTI, I.; ELSLAND, S.V.; FITZJOHN, R.; FU, H.; GAYTHORPE, K.; GREEN, W.; HAMLET, A.; HAW, D.; HAYES, S.; HINSLEY, W.; IMAI, N.; JORGENSEN, D.; KNOCK, E.; LAYDON, D.; NEDJATI-GILANI, G.; OKELL, L.C.; RILEY, S.; THOMPSON, H.; UNWIN, J.; VERITY, R.; VOLLMER, M.; WALTERS, C.; WANG, H.W.; WALKER, P.G.T.; WATSON, O.; WHITTAKER, C.; WANG, Y.; WINSKILL, P.; XI, X.; GHANI, A.C.; DONNELLY, C.A.; FERGUSON, N.M.; NOUVELLET, P. Short-term forecasts of COVID-19 deaths in multiple countries. Londres: Center for Global Infectious Disease Analysis, Imperial College London, 2020. Disponível em: <https://mrc-ide.github.io/covid19-short-term-forecasts/index.html>. Acesso em: 1º maio 2020.
- BIRKMAN, J. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies and to enhance adaptation: Conceptual frameworks and definitions. In: ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) (org.). *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*. Genebra: United Nations University Press, 2013. p. 7-54.
- BIVAND, R. *ClassInt: Choose Univariate Class Intervals*. R package version 0.4-3. 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=classInt>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- CAVALCANTE, J.R.; ABREU, A.J.L. COVID-19 in Rio de Janeiro municipality: spatial distribution of the first deaths and cases confirmed. *SciELO Preprint*, 2020. Disponível em: <https://preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/130/version/135>. Acesso em: 21 jul. 2020. <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.130>
- CODEÇO, C.T.; VILLELA, D.; COELHO, F.C.; BASTOS, L.S.; CARVALHO, L.M.; GOMES, M.F.C.; CRUZ, O.G.; LANA, R.M.; VESPIGNANI, A.; PASTORE Y PIONTTI, A.; DAVIS, J.T. *Estimativa de risco de espalhamento da COVID-19 no Brasil e avaliação da vulnerabilidade socioeconômica nas microrregiões brasileiras*. FIOCRUZ, 2020. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/28942>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- DE LÉON, J.C.V. *Vulnerability assessment: The sector approach*. In: ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) (org.). *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*. Genebra: United Nations University Press, 2013. p. 300-315.
- DOS SANTOS, J.P.C.; SIQUEIRA, A.S.P.; PRAÇA, H.L.F.; ALBUQUERQUE, H.G. Vulnerability to severe forms of COVID-19: An intra-municipal analysis in the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 36, n. 5, 2020. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-311X2020000506001&lng=en&nrm=iso&lng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2020000506001&lng=en&nrm=iso&lng=pt). Acesso em: 21 jul. 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00075720>
- FORTALEZA. *Boletim Epidemiológico: Informe Semanal COVID-19*. Fortaleza: Coordenadoria de Vigilância em Saúde, Célula de Vigilância Epidemiológica, 2020. Disponível em: <https://coronavirus.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 4 maio 2020.
- FORTALEZA. *Plano Municipal de Saneamento Básico*. Fortaleza: Secretaria Municipal de Urbanismos e Meio Ambiente, 2014.
- GAN, X.; FERNANDEZ, I.C.; GUO, J.; WILSON, M.; ZHAO, Y.; ZHAO, B.; WU, J. When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability Indicators. *Ecological Indicators*, v. 81, p. 491-502, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.068>
- GU, J.; HAN, B.; WANG, J. COVID-19: Gastrointestinal manifestations and potential fecal-oral transmission. *Gastroenterology*, v. 158, n. 6, p. 1518-1519, 2020. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2020.02.054>
- HOLSHUE, M.; DEBOLT, C.; LINDQUIST, S.; LOFY, K.; WIESMAN, J.; BRUCE, H.; SPITTERS, C.; ERICSON, K.; WILKERSON, S.; TURAL, A.; DIAZ, G.; COHN, A.; FOX, L.; PATEL, A.; GERBER, S.; KIM, L.; TONG, S.; LU, X.; LINDSTROM, S.; PALLANSCH, M.; WELDON, W.; BIGGS, H.; UYEKI, T.; PILLAI, S. First case of 2019 novel coronavirus in the United States. *New England Journal of Medicine*, v. 382, n. 10, p. 929-936, 2020. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001191>
- HOPKINS, D. *Teacher's guide to classroom research*. 3. ed. Filadélfia: Open University Press, 2002.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo demográfico*. IBGE, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 5 jun. 2019.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). *Desenvolvimento humano nas macrorregiões brasileiras*. 2016. Brasília: PNUD, IPEA, FJP, 2016. 55 p.
- INTEGRASUS. *Boletim Epidemiológico Novo Coronavírus (Covid-19)*. Ceará: Governo do Estado do Ceará, Secretaria da Saúde, Integrasus, 2020.
- IPLANFOR. *Fortaleza em Mapas*. Disponível em: <https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/#/>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 6. ed. Estados Unidos: Pearson Education, 1998. 773 p.
- LIU, Y.; NING, Z.; CHEN, Y.; GUO, M.; LIU, Y.; GALI, N.K.; SUN, L.; DUAN, Y.; CAI, J.; WESTERDAHL, D.; LIU, X.; XU, K.; HO, K.F.; KAN, H.; FU, Q.; LAN, K. Aerodynamic Characteristics and RNA Concentration of SARS-CoV-2 Aerosol in Wuhan Hospitals during COVID-19 Outbreak. *bioRxiv*, v. 582, n. 21, p. 557-564, 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.03.08.982637>
- ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OECD). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing, 2008.
- PAPATHOMA-KÖHLE, M.; CRISTOFARI, G.; WENK, M.; FUCHS, S. The importance of indicator weights for vulnerability indices and implications for decision making in disaster management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 36, p. 101103, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101103>
- PÉREZ-FOGUET, A.; GINÉ GARRIGA, R.G. Analyzing water poverty in basins. *Water Resources Management*, v. 25, p. 3595-3612, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9872-4>
- RAMOS, P.A.; MARCATO JUNIOR, J.; DECANINI, M.M.S.; PUGLIESI, E.A.; OLIVEIRA, R.F.; PARANHOS FILHO, A.C. Quantitative and qualitative evaluation of data classification methods for choropleth mapping. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 68/3, p. 609-629, 2016.
- THE LANCET. Redefining vulnerability in the era of COVID-19. *The Lancet*, v. 395, n. 10230, p. 1089, 2020. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30757-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30757-1)
- VAN DOREMALEN, N.; BUSHMAKER, T.; MORRIS, D.H.; HOLBROOK, M.G.; GAMBLE, A.; WILLIAMSON, B.N.; TAMIN, A.; HARCOURT, J.L.; THORNBURG, N.J.; GERBER, S.I.; LLOYD-SMITH, J.O.; WIT, E.; MUNSTER, V.J. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-19. *New England Journal of Medicine*, v. 382, p. 1564-1567, 2020. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>
- WU, Y.; GUO, C.; TANG, L.; HONG, Z.; ZHOU, J.; DONG, X.; YIN, H.; XIAO, Q.; TANG, Y.; QU, X.; KUANG, L.; FANG, X.; MISHRA, N.; LU, J.; SHAN, H.; JIANG, G.; HUANG, X. Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples. *Lancet Gastroenterology & Hepatology*, v. 5, n. 5, p. 434-435, 2020. [https://doi.org/10.1016/s2468-1253\(20\)30083-2](https://doi.org/10.1016/s2468-1253(20)30083-2)