

## APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO PARA A AVALIAÇÃO DE INCERTEZA E SENSIBILIDADE ESPACIAL NAS ANÁLISES DE RISCO DE OCORRÊNCIA DE DOENÇAS RESPIRATÓRIAS EM BELO HORIZONTE (MG)

**Denise Marques Sales**

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências – UFMG  
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil  
[denise.marques.sales@gmail.com](mailto:denise.marques.sales@gmail.com)

**Bráulio Magalhães Fonseca**

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências – UFMG  
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil  
[brauliomagalhaes@gmail.com](mailto:brauliomagalhaes@gmail.com)

**Wellington Lopes Assis**

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências – UFMG  
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil  
[assisw@gmail.com](mailto:assisw@gmail.com)

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar as associações entre a ocorrência de doenças respiratórias em crianças de 0 a 5 anos de idade, a vulnerabilidade em saúde e elementos climáticos em Belo Horizonte (MG), utilizando modelos espaciais, que envolvem a Análise Hierárquica de Pesos e o método de Monte Carlo. Ao demonstrar a espacialidade dos fenômenos, visou-se contribuir para um maior entendimento dos aspectos socioespaciais e ambientais. A modelagem adotada permitiu avaliar incerteza e sensibilidade espacial nas análises de riscos de agravos ao sistema respiratório, tornando-se valiosa ferramenta que permite a espacialização, melhor visualização e análise dos fatores determinantes de agravos à saúde. Foi possível identificar áreas com maior ou menor risco de ocorrência de doenças respiratórias e sua associação com comportamentos sazonais. As áreas de maior risco coincidem, em janeiro e abril, com regiões com aumento da amplitude térmica, maiores concentrações de monóxido de carbono, redução da umidade do ar e espacialmente com os setores que apresentam as categorias elevado e muito elevado do Índice de Vulnerabilidade à Saúde. Observamos que alguns tipos de organizações socioespaciais (zonas de baixa renda, próximas de complexos industriais e com alta vulnerabilidade) também causam agravos à saúde da população.

**Palavras-chave:** Análise multicritério. Análise de incerteza e sensibilidade. Elementos climáticos. Aspectos socioeconômicos. Doenças respiratórias.

### APPLICATION OF MONTE CARLO METHOD TO ASSESS SPATIAL UNCERTAINTY AND SENSITIVITY IN RISK ANALYSES OF OCCURRENCE OF RESPIRATORY DISEASES IN BELO HORIZONTE (MG)

### ABSTRACT

This study aimed to assess the associations between the occurrence of respiratory diseases among children aged 0 to 05 years old, health vulnerability, and climatic elements in Belo Horizonte (MG), using spatial models involving Hierarchical Weight Analysis and Monte Carlo method. While demonstrating the phenomena spatiality, the aim was to contribute to a greater understanding of socio-spatial and environmental aspects. The model adopted enabled the assessment of spatial uncertainty and sensitivity in the analysis of damage risks to the respiratory system, making it a valuable tool that allows for spatialization, better visualization, and analysis of the determinant factors of health conditions. It was possible to identify areas with greater or lesser risk of occurrence of respiratory diseases and their association with seasonal behaviors. The areas at greatest risk coincide, in January and April, with regions with increased thermal amplitude, higher concentrations of carbon monoxide, reduced air humidity and with sectors that present high and very high categories of the Health Vulnerability Index. It was observed that some types of socio-spatial organizations (low-income areas, close to industrial complexes and with high vulnerability) also cause harm to the health of the population.

**Keywords:** Multicriteria analysis. Uncertainty and sensitivity analysis. Climatic elements. Socioeconomic aspects. Respiratory diseases.

## INTRODUÇÃO

No campo das geociências, o processo de modelagem avançou com a consolidação do geoprocessamento e de suas diversas ferramentas de suporte técnico-metodológico. As análises em ambiente dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e ferramentas de geoprocessamento têm permitido uma varredura mais eficiente das feições de interesse na área de estudo, além de possibilitarem a compilação de dados de diferentes grandezas (XAVIER-DA-SILVA et al., 2001; CATAO, REOLON e MIYAZAKI, 2010; BARROZO, 2014; FREITAS, 2020).

Nos últimos anos, os SIGs passaram a atuar como ferramenta de apoio em estudos, auxiliando, por exemplo, a identificação, a localização e o acompanhamento de populações que residem em áreas consideradas de risco, ou mesmo que se encontram em situação de vulnerabilidade. A modelagem se dá com a representação simplificada da realidade, de forma a complementar e ser considerada um produto geográfico. São gerados mapas temáticos a partir de modelagens que configuram importante instrumento na análise espacial do risco de determinada doença.

[...] os mapas são instrumentos valiosos em estudos epidemiológicos e podem-se listar três objetivos principais de sua produção. O primeiro é descritivo e consiste da simples visualização da distribuição espacial da doença na região de interesse. O segundo objetivo, exploratório, é sugerir determinantes locais de doenças e fatores etiológicos desconhecidos que possam ser formulados em termos de hipóteses a serem investigadas posteriormente. Finalmente, um terceiro objetivo é apontar associações entre fontes potenciais de contaminação e áreas de risco elevado (ASSUNÇÃO et al., 1998, p. 714).

A utilização de técnicas do geoprocessamento em desfechos de saúde tem ganhado destaque, principalmente na última década, possibilitando associações de diferentes fontes de dados, fornecendo elementos indispensáveis para o planejamento em saúde, construção de protocolos, organização, planejamento de ações em saúde e auxiliando na tomada de decisão de gestores (BARROZO, 2014; REIS et al., 2018; GURGEL e BELLE, 2019; GUIMARÃES, CATAO e NOSSA, 2020; SALDANHA, BARCELLOS e PEDROSO, 2020; RESER, 2021). Dentro dessa perspectiva da abordagem geográfica e sua interface com a saúde humana, estudos, em diferentes escalas, têm buscado associações entre os fatores ambientais e de infraestrutura urbana com as localizações geográficas de crises respiratórias (BARCELLOS et al., 2009; FONSECA e VASCONCELOS, 2011; ANTUNES et al., 2013; UBILLA e YOHANNESSEN, 2017; SALES, ASSIS e FONSECA, 2018; SILVEIRA, 2019; SOUZA et al., 2019; NEISANI SAMANI, KARIMI e ALESHEIKH, 2020).

Nesta pesquisa, foi necessária a seleção de elementos climáticos e socioeconômicos que pudessem proporcionar a identificação de diferentes riscos à saúde respiratória da população de crianças no grupo etário de 0 a 5 anos<sup>1</sup> de idade de Belo Horizonte (MG) e, na sequência, foi feita a inserção desses elementos em um modelo ambiental. Partiu-se afirmação do Ministério da Saúde (2010) de que “as doenças respiratórias crônicas estão aumentando em prevalência particularmente entre as crianças e os idosos; piorando a qualidade de vida e podendo provocar incapacidade nos indivíduos afetados”, e da afirmação de Ubilla e Yohannessen (2017) que “as crianças são um grupo particularmente vulnerável devido à imaturidade do sistema respiratório e imunológico e às condutas da idade”.

Alguns documentos emitidos pela OMS (2010, 2016 e 2018) afirmam que as crianças são particularmente vulneráveis a riscos ambientais. No relatório publicado pela Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2018) intitulado “Não polua meu futuro! O impacto do ambiente na saúde das crianças”<sup>2</sup> assevera-se que “As infecções respiratórias inferiores estão entre as principais causas de morte em crianças, representando 16,5% das mortes de crianças com menos de cinco anos em 2012 e 15,5% em 2015”<sup>3 4 5</sup>, e que “Os riscos ambientais mais importantes são a poluição do ar no domicílio pela exposição à fumaça de fogões, a poluição atmosférica e o tabagismo passivo, sendo elas são responsáveis por mais de 50% das infecções respiratórias inferiores em crianças, podem

<sup>1</sup> Optou-se por considerar apenas criança com faixa etária de 0 a 5 anos, sabendo que se trata de uma parcela da população considerada vulnerável ao acometimento deste tipo de doença, e um grupo que normalmente vive, estuda, tem seus momentos de lazer próximo a seus lares, não possuindo, assim, uma locomoção dinâmica e variável ao longo do dia, mês e ano.

<sup>2</sup> OPAS. Organização Pan-Americana da Saúde. Não polua o meu futuro! O impacto do ambiente na saúde das crianças. Licença: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <<https://iris.paho.org/handle/10665.2/49123>>, acessado em 28 de julho de 2022, disponível em português.

<sup>3</sup> OMS. Global Health Observatory (GHO) data: Causes of child mortality [website]. Genebra: Organização Mundial da Saúde; 2016 < [https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/sdg-target-3\\_2-newborn-and-child-mortality](https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/sdg-target-3_2-newborn-and-child-mortality)>, acessado em 28 de julho de 2022, disponível em inglês.

<sup>4</sup> OMS, PNUMA. Healthy Environments for Healthy Children, key messages for action. Genebra: Organização Mundial da Saúde, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente; 2010.

<sup>5</sup> OMS. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Genebra: Organização Mundial da Saúde; 2016.

ocasionar também as infecções respiratórias superiores, como faringite, laringite, sinusite ou otite média<sup>6</sup>. Diante dessas evidências, optou-se por selecionar esse grupo etário, crianças de 0 a 5 anos, como sujeitos de pesquisa.

Para a realização da análise espacial,

um número de métodos AMC, incluindo combinação linear com pesos (MALCZEWSKI, 2002), análise hierárquica de pesos (AHP) (SAATY, 1980), métodos de pontos de referência (HWANG; YOON, 1981), e métodos hierárquicos (ROY, 1996) têm sido propostos e adotados em SIG e análise espacial para resolver os problemas de uma ampla variedade de áreas (JANKOWSKI, 2016, p. 116).

De acordo com Moura e Jankowski (2016), a análise multicritério (AMC) tem sido usada com frequência entre os pesquisadores que adotam os SIGs como ferramenta de análise de dados e tomada de decisão. Trata-se de uma álgebra de mapas, cujo objetivo é a construção de modelos descritivos ou preditivos do território, em diferentes escalas e para aplicações diversas, viabilizando a integração de variáveis espaciais (MOURA e JANKOWSKI, 2016; JANKOWSKI *et al.*, 2020; NAJWER, 2022).

Esse método apresenta uma hierarquia, baseada em julgamentos de profissionais ou pesquisadores relacionados com a temática abordada, saúde urbana e doenças respiratórias. A esses profissionais propõe-se um conjunto de variáveis ou indicadores que devem ser comparados e indicados numa sequência, segundo o grau de importância de um em relação ao outro.

Com o objetivo de lidar com o grau de certeza ou incerteza do processo, bem como com os resultados da análise multicritério, as análises de incerteza e sensibilidade espacial, realizadas por meio do Método ou Simulação de Monte Carlo (SMC), consistem em simular diferentes pesos possíveis para as variáveis, dentro de limites de máximo e mínimo em uma faixa de valores (MOURA, 2007; LIGMANN-ZIELINSKA *et al.*, 2012; LIGMANN-ZIELINSKA e JANKOWSKI, 2014; MOURA e JANKOWSKI, 2016; JANKOWSKI *et al.*, 2020). Esse exercício de análises de incerteza e sensibilidade justificam-se pelo caráter subjetivo do processo de atribuição de pesos às variáveis avaliadas, o qual envolve a definição de critérios, pesos e a multiplicidade de especialistas consultados.

As análises espaciais voltadas para a avaliação da aptidão do uso da terra e ocupação do território envolvem uma gama de fatores passíveis de descrever e explicar o funcionamento de determinado sistema ambiental. Essa diversidade de dados favorece que a análise multicritério seja empregada para relacionar múltiplas variáveis e compor síntese de valor, relacionando processos físicos, ecológicos e socioeconômicos (MALCZEWSKI, 1999, 2004, 2006; FONSECA, 2015; BUBALO, VAN ZANTEN e VERBURG, 2019). Destaca-se também estudos na área de planejamento urbano (BROWN, 2015; CZEPKIEWICZ, JANKOWSKI e MLODKOWSKI, 2017) e na área de doenças respiratórias e poluição do ar (NEISANI SAMANI, KARIMI e ALESHEIKH, 2020; SAMULOWSKA *et al.*, 2021) adotando a abordagem de *crowdsourcing* com objetivo de minimizar os subjetivismos e basear-se na participação do público e na opinião de especialistas para alcançar resultados satisfatórios sobre uma temática abordada.

A escolha do município de Belo Horizonte foi realizada tendo em conta sua representatividade como metrópole regional no Estado de Minas Gerais. Enquanto tal, ela é a sexta cidade mais populosa do Brasil, com projeção populacional do ano de 2021 em mais de 2,5 milhões de habitantes, e uma área de 331km<sup>2</sup>. Destaca-se a tradição municipal de registrar cartograficamente distintos elementos do ambiente urbano, bem como a organização de bancos de dados com informações relacionadas ao meio ambiente e saúde. Ademais a capital mineira possui uma distribuição de estações climatológicas superiores à média dos municípios mineiros.

Belo Horizonte apresenta características fisiográficas e socioambientais que contribuem para uma diversidade de topoclimas e mesoclimas, que podem potencializar a ocorrência das doenças do aparelho respiratório, os quais são marcados pela

Serra do Curral, alongada no sentido nordeste-sudeste, referência limítrofe entre ocupações do espaço mineiro. Suas rochas resistentes e formações escarpadas expressam a força do quadrilátero ferrífero, interpondo-se às intempéries naturais. A ela se contrapõem os morros arredondados e aplainados do Planalto Bambuí. Nas partes íngremes da serra, o clima úmido e fresco expressa-se numa vegetação mais abundante e rica, enquanto nos mares de morros ao norte as mesmas chuvas intensas, caindo sobre o solo poroso que abriga a vegetação do cerrado, produzem um clima seco e quente. (MONTE-MÓR, 1994, p. 12)

A microrregião onde se implantou Belo Horizonte apresenta duas unidades geológicas e geomorfológicas marcadas e distintas: as encostas da Serra do Curral e a Depressão de Belo

<sup>6</sup> OMS. Global Health Observatory (GHO) data: Child health [website]. Genebra: Organização Mundial da Saúde; 2016 <<https://www.who.int/data/gho/data/themes/theme-details/GHO/child-health>> acessado em 28 de julho de 2022, disponível em inglês.

Horizonte, têm como formação rochosa o granito-gnaise, contida nas microbacias dos ribeirões Arrudas e do Onça, entremeio da mata atlântica e do cerrado (MONTE-MÓR, 1994). Inserida na faixa intertropical

sua pequena distância do Trópico de Capricórnio (somente 3° 30' de latitude) implica em uma realidade de transição entre a atuação de sistemas atmosféricos típicos dos regimes tropicais, com período seco e úmido definidos, observados em grande parte do Sudeste brasileiro, e aqueles subtropicais, permanentemente úmidos, característicos da região Sul. (ASSIS, 2010, p. 72)

Segundo Assis (2013) e colaboradores, as condições atmosféricas observadas no município de Belo Horizonte são controladas pela atuação de sistemas sinóticos estáveis, tais como o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e a Massa Polar Atlântica (mPa), e instáveis, como Frentes Frias (FF), Frentes Estacionárias (FE), Linhas de Instabilidade (LI), Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Entretanto, os totais pluviométricos diários mais significativos ocorreram durante a atuação da ZCAS e das LI. Vale destacar que as Instabilidades Convectivas Locais (ICL) têm uma participação importante nas chuvas torrenciais nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março.

De acordo com os dados das Normais Climatológicas (1981 – 2010)<sup>7</sup>, a temperatura média compensada anual de Belo Horizonte é de 21,8 °C, registrando as maiores médias mensais em fevereiro (23,8 °C) e as menores em julho (19,1 °C), quanto a precipitação acumulada, dezembro representa o mês de maior volume acumulado (358,9 mm) e o de menor em julho (7,9 mm). Caracterizado por dois períodos bem definidos, o período úmido (outubro a março) e o período seco (abril a setembro), possui precipitação acumulada anual de 1602,6 mm, e umidade relativa média anual de 67,2%.

A altitude média de Belo Horizonte é de 860 m, chegando a 1506 m ao sul da regional Barreiro, e apresentando cota de 670 m a 800 m ao longo dos leitos fluviais do Ribeirão Arrudas e Ribeirão do Onça. De acordo com Assis (2010), tais características topográficas tendem a “amenizar” as temperaturas a medida que se elevam as cotas e ao mesmo tempo influenciam no campo anemométrico, implicando em diferenciações topo e mesoclimáticas dentro do município. Em geral os bairros localizados nas proximidades da Serra do Curral apresentam médias menores se comparados aos localizados nas regiões de Venda Nova, Pampulha e Norte, estas mais deprimidas. O mesmo autor afirma que o gradiente térmico vertical atmosférico médio de 0,65 °C /100 possibilita uma diferenciação térmica teórica de 5,4° C entre as unidades topoclimáticas encontrados no município. Essas diferentes feições geográficas contribuem também para a exacerbação de problemas resultantes da degradação ambiental, tais como a formação de ilhas de calor e concentração de poluentes (ASSIS, 2010).

O presente estudo averigua a existência ou inexistência de associação entre os fatores climáticos e socioeconômicos em face da ocorrência de doenças respiratórias, por meio do cruzamento de variáveis espaciais. Seu objetivo central é identificar a disposição espacial da ocorrência de doenças respiratórias no município mencionado, proporcionar uma avaliação que implicará a reflexão do “porquê”, “onde”, “como” e “quando” ocorrem as associações, além de reforçar a eficiência das técnicas de geoprocessamento nas análises espaciais geoclimáticas.

Mesmo que não existam novas respostas às questões postas à longa data e que não ecoem soluções aparentes e de fácil resolução para elas, segundo Marandola Jr. e Hogan (2009), problematizá-la já implica parte do caminho de redescoberta do sentido do habitar contemporâneo, expressão maior da relação da população com seu ambiente. Para tanto, vale nos munirmos do cabedal teórico metodológico disponível e entrelaçar aos conceitos geográficos os de saúde pública, adotar técnicas de geoprocessamento e ferramentas de modelagem ambiental, e buscar novas respostas contando com uma análise mais afeita à realidade que cerca a saúde populacional efetivamente.

## METODOLOGIA

Para atingir o objetivo proposto, foram utilizados registros mensais de cinco estações meteorológicas pertencentes à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) e de quatro estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados registrados se referiram aos anos de 2013 e 2014. As informações relacionadas às doenças respiratórias foram disponibilizadas pela Secretaria

<sup>7</sup> Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>.

Municipal de Saúde do município de Belo Horizonte (SMSA), com a aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa – CAAE 81047717.9.0000.5140. Os dados da malha urbana de Belo Horizonte foram fornecidos pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL).

A escolha dos meses de janeiro e abril para este estudo deriva da frequência no número de registros de ocorrências de doenças respiratórias na população alvo, sendo o menor número em janeiro nos dois anos e o maior em abril, também nos dois anos. A escala espacial adotada correspondeu à menor área administrativa para fins de gestão e planejamento, os setores censitários de 2010, definidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Ressalta-se que, para a elaboração das modelagens espaciais e mapas temáticos, calculamos as médias dos valores para os meses de janeiro (2013 e 2014) e abril (2013 e 2014).

As variáveis eleitas para este estudo foram: umidade relativa (%), temperatura média (°C), amplitude térmica mensal (°C), partículas inaláveis – PM10 (<10µm/m<sup>3</sup>), monóxido de carbono – CO (ppm), densidade populacional (hab/Km<sup>2</sup>) e Índice de Vulnerabilidade à Saúde (IVS).

A Análise Hierárquica de Pesos (AHP) foi elaborada a partir da consulta a profissionais da saúde por meio de questionário via Google Drive, realizada em duas rodadas de envio, para definir os pesos das variáveis. Aos participantes foi solicitada a classificação com valores de 1 (menor importância) a 9 (maior importância) para o agravo das doenças respiratórias em crianças, seguindo a escala numérica fundamental de Saaty (1980). Tal escala, que pode ser vista na Tabela 1, propõe a estruturação dos critérios, a coleta de julgamentos de profissionais ou pesquisadores da área, e a percepção das prioridades.

Tabela 1 - Escala de comparação pareada de critérios segundo Saaty (1980).

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada	Um fator é ligeiramente mais importante que o outro.
5	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante que o outro.
7	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido, e sua maior relevância foi demonstrada na prática.
9	Importância extrema	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2,4,6,8	Valores intermediários	Possibilidade de compromissos adicionais.

Fonte - Adaptada de MOURA (2007, p. 2904).

O peso 0 (zero) não foi atribuído como mínimo porque se considera que nenhuma das variáveis é desprezível, assim como o peso 10, evidenciando que nenhuma das variáveis possui importância tão grande sobre as demais. Desse modo, os profissionais organizaram uma hierarquização das variáveis comparando-as par a par.

Foram convidados 38 profissionais e obtidas 10 respostas. As áreas de atuação desses profissionais eram respectivamente: enfermagem (1), saúde pública e epidemiologia (1), fisioterapia e saúde urbana (1), pneumologia pediátrica (4), pediatria (1), medicina (1) e pediatra/alergia e imunologia (1).

De posse das respostas, três cenários foram eleitos: o primeiro, o “cenário geral”, que continha o valor médio dos pesos atribuídos a cada variável; o segundo, com as respostas do “especialista 1”; e o terceiro, com as respostas do “especialista 2”.

Em seguida, os dados foram tratados para a realização das análises. As sete camadas de informação, correspondendo às variáveis de análise tanto para janeiro (2013 e 2014) quanto para abril (2013 e 2014), com suas respectivas informações, foram transformadas em *raster* (com pixel de 200 metros), sendo posteriormente normalizadas de acordo com a Equação 1:

$$([\text{matriz}] - V_{\text{min}}) * 1 / (V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}) \quad (1)$$

em que:

Matriz: *raster* de cada variável

Vmín: valor mínimo encontrado no *raster*

Vmáx: maior valor encontrado no *raster*

Conforme esclarecem Moura e Jankowski (2016), a comparação das variáveis requer que elas sejam apresentadas de modo normalizado, o que significa que devem conter o mesmo valor mínimo e o mesmo valor máximo, neste caso padronizadas em escala de 0 a 1. Toma-se como base que quanto menor o valor (mais próximo de zero), menor o impacto, e quanto maior o valor mais próximo de um, maior o impacto. Sendo assim, a variável umidade relativa, ao final da normalização, precisou ter seus valores invertidos, pois quanto menor a umidade, maior o agravo às doenças respiratórias.

Depois de efetuado o processo de rasterização de todas as variáveis (janeiro e abril de 2013 e de 2014), aplicou-se a análise hierárquica de pesos com o auxílio da ferramenta extAHP20 no *software* ArcGIS 10.5. Essa ferramenta estima automaticamente os pesos e o grau de consistência dos resultados. De acordo com Souza (2018), a metodologia pode ser resumida nos seguintes tópicos:

- Construção da matriz de comparação pareada;
- Cálculo do autovetor principal;
- Cálculo do autovalor máximo;
- Cálculo do Índice de Consistência – *Consistency Index* (CI);
- Cálculo de Índice de Aleatoriedade – *Random Index* (RI);
- Cálculo do Grau de Consistência – *Consistency Ratio* (CR).

De maneira sintética, a sequência de realização da Análise Hierárquica de Pesos adotada está exposta no Quadro 1 a seguir, e contém as etapas metodológicas e os passos que foram executados em cada etapa:

Quadro 1 - Resumo das etapas da Análise Hierárquica de Pesos ou Multicritério.

Sequência	Etapas metodológicas	Passos executados
1ª	Definição de objetivos e aplicações no uso do sistema	Identificação de áreas com potencial de ocorrência de doenças respiratórias, representação das variáveis (n=6) selecionadas.
2ª	Organização de dados alfanuméricos e cartográficos	Interpolação através do método Inverse Distance Weighting (IDW), transformação em <i>raster</i> mediante o cálculo da média dos dados climáticos de 2013 e 2014 para os meses de janeiro e abril.
3ª	Tratamento dos dados para a composição de representações matriciais ( <i>rasters</i> ) para análise e representação da distribuição potencial do fenômeno	Normalização dos dados climáticos e densidade demográfica (utilizando dados populacionais do censo de 2010) no intervalo de 0 a 1.
4ª	Definição de pesos das variáveis e de valores para seus componentes de legenda.	Análise das respostas dos questionários enviados pelo Google Drive aos profissionais da área de saúde. Definição de um "cenário geral".
5ª	Integração das variáveis na Análise de Multicritérios	Inserção dos <i>rasters</i> na ferramenta, inserção dos pesos par a par dos questionários, média global.
6ª	Comparação com a realidade existente	Realização de uma segunda rodada com novos questionários para a inserção da variável socioeconômica e de vulnerabilidade à saúde representada pelo Índice de Vulnerabilidade à Saúde (IVS).
7ª	Calibração do sistema e retorno para a fase da análise	Calibração do sistema com as 6 variáveis + IVS (normalizados 0-1). Inserção dos pesos das variáveis comparadas par a par, gerados pela segunda rodada dos questionários, novamente considerado o "cenário geral".
8ª	Construção de cenários (if/then)	Análise dos resultados obtidos e comparação com as interpolações realizadas para os dados climáticos de janeiro e abril para os anos de 2013 e 2014. Identificação e verificação de áreas de maior e menor potencial de ocorrência de doenças respiratórias.
9ª	Elaboração de propostas de intervenção, gestão e restrições	Esboço de propostas mediante o resultado alcançado, relacionadas às ações de saúde pública no tocante a doenças respiratórias. Tomada de decisão dos gestores municipais.

Fonte - Elaborado com base em MOURA (2005; 2007).

Os resultados da etapa de Análise Hierárquica de Pesos ou Multicritério são apresentados em forma de tabelas e mapas na seção de análises e discussões.

### **Análise de Incerteza e Sensibilidade**

As etapas da Simulação de Monte Carlo (SMC) aplicadas neste estudo foram embasadas em leituras e modelos presentes em Ligmann-Zielinska e Jankowski (2014), Ligmann-Zielinska et al. (2012), Martins e Coelho (2012), Ligmann-Zielinska e Sun (2010), Saltelli et al. (2010) e Costa (2004), resultando na análise de incerteza espacial e de sensibilidade, conforme sintetizado na Figura 1.

O processo consiste em simular diferentes possíveis pesos para as variáveis, dentro de limites de máximo e mínimo em uma faixa de valores (MOURA, 2007; LIGMANN-ZIELINSKA et al., 2012; LIGMANN-ZIELINSKA e JANKOWSKI, 2014; MOURA e JANKOWSKI, 2016; JANKOWSKI *et al.*, 2020). Para tanto, utilizou-se o conjunto de ferramentas denominado “*Monte Carlo Weighted Sum*”<sup>8</sup>.

O primeiro passo foi a conversão das matrizes representando as seis variáveis analisadas para formato vetorial de pontos, tornando-os compatíveis com a ferramenta *Monte Carlo Weighted Sum* de análise espacial, utilizada nos próximos passos. A partir dos valores gerados nos três cenários pela AHP, descrita no tópico anterior, foram calculados valores máximos (= média mais o desvio padrão), desvio padrão (DP = variação entre maior e menor valor), mínimo (= média menos o desvio padrão) e média (= soma dos valores divididos por três), expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Belo Horizonte (MG): Estatística básica para a realização da AMC.

Variável	Pesos			Estatísticas			
	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Máx.	DP	Mín.	Méd.
IVS	22,655	34,788	32,467	35,229	5,259	24,711	29,970
Dens. Demográfica	14,720	31,497	15,946	28,357	7,636	13,085	20,721
Amplitude Térmica	7,628	7,106	16,708	14,889	4,409	6,072	10,481
PM10	16,325	7,106	9,594	14,903	3,894	7,114	11,008
CO	16,325	8,651	9,594	14,940	3,417	8,106	11,523
Umidade Relativa	14,720	3,013	9,594	13,901	4,792	4,317	9,109

Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Legenda - Máx.: valor máximo; DP: desvio padrão; Mín.: valor mínimo; Méd.: valor médio.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de pesos máximos e mínimos usados na SMC.

Tabela 3 - Belo Horizonte (MG): Valores máximos e mínimos para a SMC.

Valores para a Simulação de Monte Carlo		
Variável	Máx.	Mín.
IVS	0,352	0,247
Densidade Demográfica	0,284	0,131
Amplitude Térmica	0,149	0,061
PM10	0,149	0,071
CO	0,149	0,081
Umidade Relativa	0,139	0,043

Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

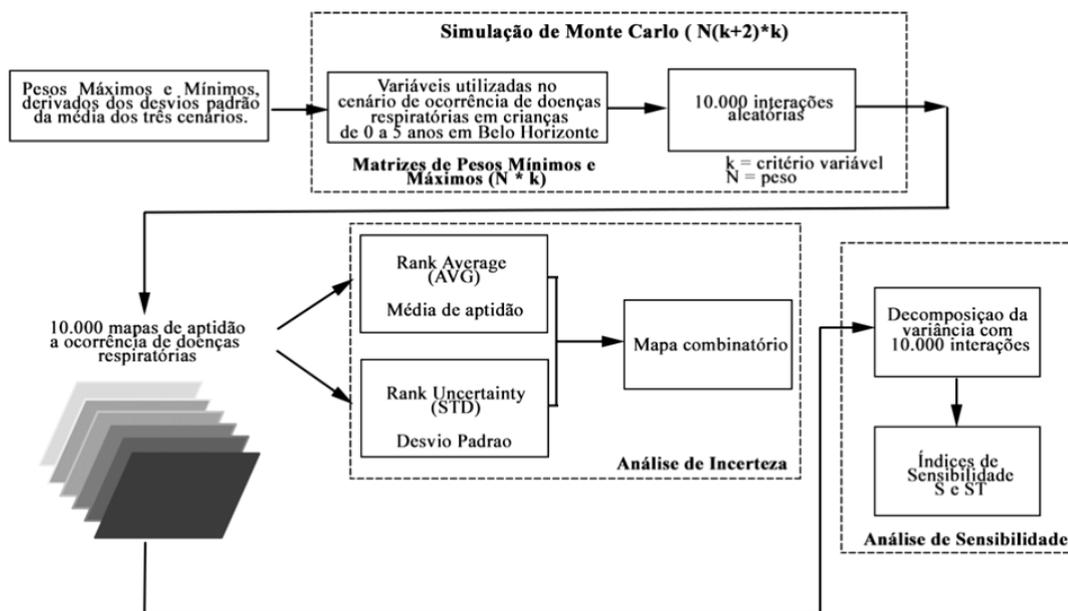
Legenda - IVS: Índice de Vulnerabilidade à Saúde; PM10: partículas inaláveis de diâmetro inferior a 10 microns; CO: monóxido de carbono; Máx.: valor máximo; Mín.: valor mínimo.

<sup>8</sup> Ferramenta disponível em <http://geo.msu.edu/extra/stsa/software.html>. Nesse link, é possível acessar um pacote independente para calcular os índices de sensibilidade de primeira ordem e de efeito total para avaliação multicritério espacial baseada em *raster*.

Esse conjunto de pesos máximos e mínimos foi usado para calcular as múltiplas matrizes de risco à ocorrência de doenças respiratórias, as quais serão resultado de 10.000 interações ou 10.000 análises de multicritério que decorrem de: [1] uma superfície de adequação média (risco médio) (AVG), [2] uma superfície de incerteza espacial explícita (desvio padrão - STD) e [3] um índice de sensibilidade total e local (S e ST), os quais permitiram identificar as variáveis que mais contribuíram para as incertezas espaciais apresentadas no mapa de incerteza (LIGMANN-ZIELINSKA e JANKOWSKI, 2014).

Acompanhando a sequência do fluxograma a seguir (Figura 1), em sua última etapa, a análise de sensibilidade foi efetuada com a utilização da ferramenta *Variance Decomposition*, aplicada para quantificar a influência de cada peso das variáveis na variabilidade do modelo.

Figura 1 - Fluxograma da Análise e Incerteza e Sensibilidade.



Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Os dois índices de sensibilidade são calculados para cada elemento de entrada do modelo (pesos das variáveis): um índice de primeira ordem (S), que corresponde à incerteza de cada variável separadamente; um índice de efeito total (ST), que possibilita explicar as interações entre as variáveis e seus respectivos pesos, ou seja, a incerteza relacionada à associação espacial entre as variáveis. Quanto maior o valor desses índices, maior será a sensibilidade ou o grau de incerteza atribuído ao modelo (LIGMANN-ZIELINSKA e JANKOWSKI, 2014, p. 236).

Os valores de S representam o quanto de incerteza cada variável traz para o modelo, e os valores de ST dizem respeito à interação com as demais variáveis e seus respectivos pesos. Tais valores são analisados com detalhe na próxima seção.

A fim de facilitar a visualização e tornar a interpretação mais dinâmica, optou-se por normalizar esses resultados da coluna valores médios (AVG - *average values*) e de desvio padrão (STD - *standard deviation*) e representá-los em duas faixas (classes), através da classificação pelo método quantil. Em seguida, através da ferramenta *reclassify*, do segmento *spatial analyst*, atribuíram-se novos valores para os menores e os maiores valores classificados em cada *raster*, obtendo-se, assim, o resultado da Rank STD (0 e 1) e da Rank AVG (0 e 2). De posse dessas matrizes já preparadas, realizou-se uma análise combinatória espacial conforme descrito em Moura et al. (2016) e Fonseca (2015).

A análise combinatória foi executada por meio de algoritmo de álgebra de mapas denominado *raster calculator*, do *software* ArcGIS. O cruzamento dos dados contou com a transformação das informações em mapas, no formato *raster*, e reclassificados em seguida com valores da matriz de comparação exibidos na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Belo Horizonte (MG): Matriz Combinatória Rank AVG x Rank STD.

		Rank STD (Incerteza)	
		Baixa	Alta
		0	1
Rank AVG (Potencial)	Baixo	0	1
	Alto	2	3

Onde:

0 = Baixo Potencial/Baixa Incerteza

1 = Baixo Potencial/Alta Incerteza

2 = Alto Potencial/ Baixa Incerteza

3 = Alto Potencial/Alta Incerteza

Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

De posse das respostas e eleito o “cenário geral”, a análise hierárquica de pesos favoreceu a geração da matriz, apresentada na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Belo Horizonte (MG): Matriz com os resultados dos pesos obtidos pela comparação par a par na AHP.

Cenário Geral							
	Umidade relativa	Amplitude térmica	PM10	CO	Dens. Demo	IVS	Temp. Média
<i>Umidade relativa</i>	1	2	1	1	1	0,5	2
<i>Amplitude térmica</i>	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,333	1
<i>PM10</i>	1	2	1	1	1	1	2
<i>CO</i>	1	2	1	1	1	1	2
<i>Dens. Demográfica</i>	1	2	1	1	1	0,5	2
<i>IVS</i>	2	3	1	1	2	1	3
<i>Temperatura Média</i>	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,333	1
<b>CR*: 0</b>							
*consistency ratio							

Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Legenda - PM10: partículas inaláveis de diâmetro inferior a 10 microns; CO: monóxido de carbono; Dens. demo: densidade demográfica; IVS: Índice de Vulnerabilidade à Saúde; Temp. média: temperatura média.

Desta etapa da modelagem foram obtidos os valores da Tabela 6, onde são apresentados os pesos subsequentes, para cada uma das variáveis. Observa-se que a variável IVS apresentou maior peso conforme a opinião dos especialistas consultados, seguida dos particulados (PM10 e CO) e da umidade relativa. Para essa rodada (cenário geral), a variável amplitude térmica e temperatura média alcançaram valores semelhantes e menos significativos no modelo.

Tabela 6 - Belo Horizonte (MG): Resultado da Análise Hierárquica de Pesos ou Multicritério.

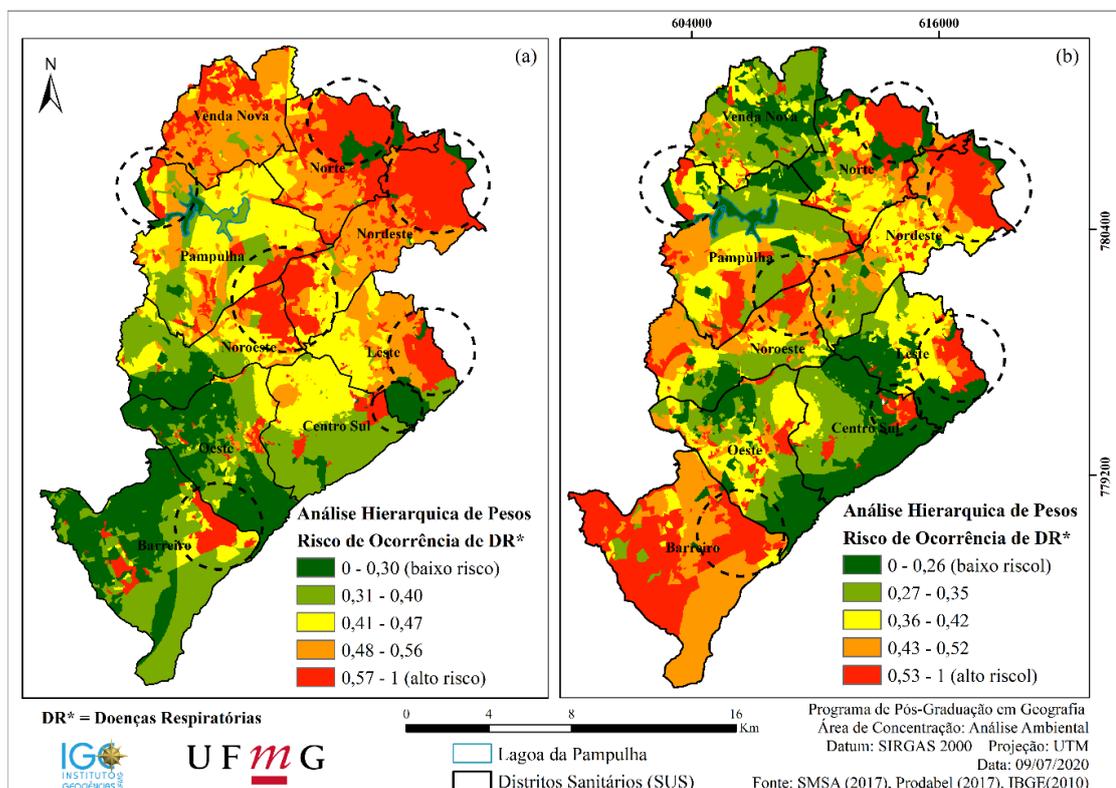
Cenário Geral	
Variável	Peso AMC
IVS	22,655
Densidade Demográfica	14,72
Amplitude Térmica	7,628
Temperatura Média	7,628
PM10	16,325
CO	16,325
Umidade Relativa	14,72

Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Legenda - IVS: Índice de Vulnerabilidade à Saúde; PM10: partículas inaláveis de diâmetro inferior a 10 microns; CO: monóxido de carbono; Máx.: valor máximo; Mín.: Valor mínimo.

Os pesos da Tabela 6, ao serem espacializados, resultaram em mapas de risco de ocorrência de doenças respiratórias no município de Belo Horizonte e compõem a Figura 2. A partir desse resultado, é possível identificar visualmente e com mais rapidez, assim como verificar áreas de maior risco (áreas em vermelho e laranja) e menor risco (áreas em tons de verde) de ocorrência de doenças respiratórias.

Figura 2 - Belo Horizonte (MG): Resultado da Análise Hierárquica de Pesos (AHP) para o mês de janeiro (a) e abril (b), 2013-2014.



Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Considerando o resultado do risco de ocorrência de doenças respiratórias apresentado na Figura 2, é possível verificar as áreas que apresentam alto risco para a ocorrência de doenças respiratórias (círculos pontilhados em preto) em diferentes meses (janeiro e abril) com comportamentos sazonais distintos. São áreas que coincidem espacialmente com as categorias elevado e muito elevado do Índice de Vulnerabilidade à Saúde (IVS).

Essas áreas de elevado risco de ocorrência de doenças respiratórias (tons de vermelho e laranja) coincidem, em janeiro, com regiões que mostraram um aumento da amplitude térmica combinada com maiores concentrações de monóxido de carbono. Elas se concentram em cinco dos nove distritos sanitários de Belo Horizonte (Venda Nova, Norte, Nordeste, Noroeste e Leste). Já as áreas de menor risco (tons de verde) estão correlacionadas com menor concentração de monóxido e maior umidade.

Para o mês de abril, mantém-se o padrão espacial de manchas, com maior risco de ocorrência nos distritos sanitários Norte, Nordeste, Noroeste e Leste, associado ao aumento das concentrações de monóxido de carbono e à redução da umidade, em combinação com o aumento da amplitude térmica. Porém, vale observar também um espriamento das cores quentes pelo território, indicando maior dispersão espacial no risco de ocorrência de doenças respiratórias. Entende-se, assim, que o mês de abril traz um risco maior à população estudada.

Cabe reforçar as análises espaciais da região do Barreiro, também para o mês de abril, em que houve um aumento significativo do potencial de agravos à saúde respiratória. Esse resultado estabelece uma relação com o conceito de bacia aérea como unidade de controle ambiental e reforça o resultado encontrado por Radicchi (2012), que afirma que,

assim como a água que se distribui no território em forma de bacia hidrográfica, também o ar apresenta uma dispersão por uma área geográfica conhecida como bacia aérea. Na região metropolitana de Belo Horizonte, esta bacia é confrontada pelo cinturão das serras do Curral Del Rei e da Moeda, ao sul, e o complexo do Espinhaço ao Norte [SIC]. Nesse corredor, onde o vento circula predominantemente no sentido leste-oeste os poluentes atmosféricos se concentram na região do Barreiro e na área industrial de Contagem e Betim (RADICCHI, 2012, p.196).

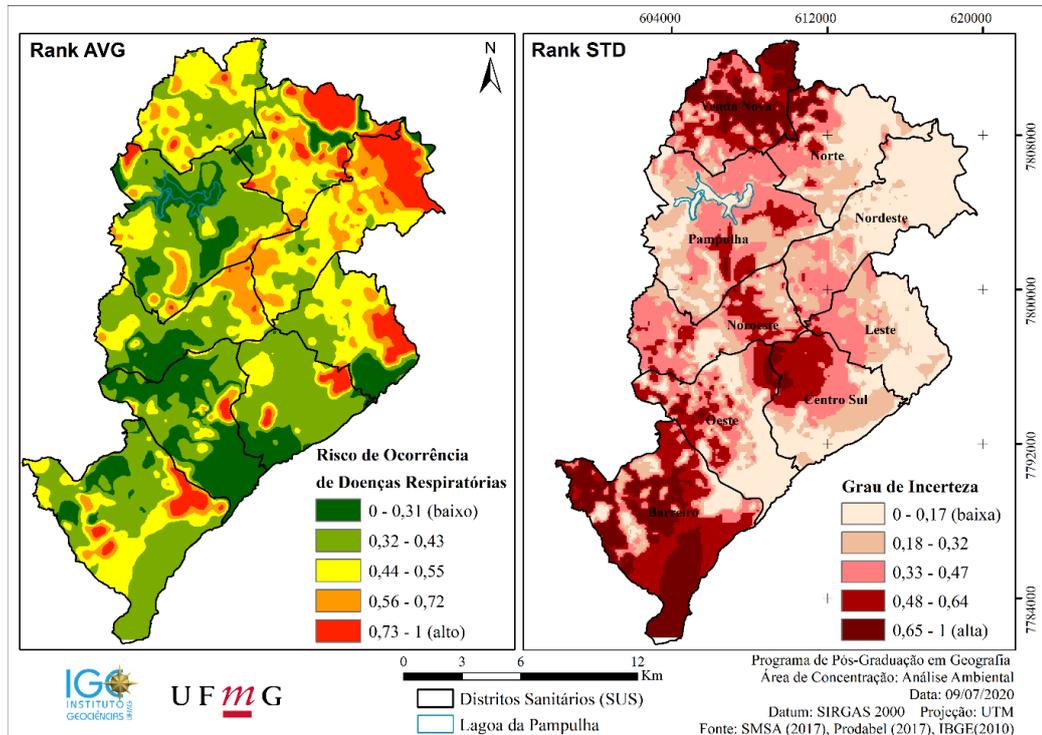
As áreas com baixo risco de ocorrência de doenças (tons de verde), no mês de abril, podem ser correlacionadas com o aumento da umidade relativa, combinada com menor amplitude térmica e menor concentração de monóxido de carbono em relação a outras porções da malha urbana.

Predominantemente, as áreas de baixo risco aparecem nos dois meses (janeiro e abril) alinhadas à Serra do Curral. Assim como em alguns pontos na área norte da cidade, coincidem em outras regiões com manchas verdes da cidade, e com áreas de IVS categorizado como baixo, sendo esse um marcador de lugar, classificado, com prevalência, como baixo índice de vulnerabilidade à saúde.

Da Simulação de Monte Carlo, foi gerado o mapa de incerteza (desvio padrão - STD), que resulta do desvio padrão de 10.000 interações de multicritério. Com a decomposição da variância dessas 10.000 interações, obteve-se o índice de sensibilidade total e local (S e ST) (LIGMANN-ZIELINSKA e JANKOWSKI, 2014).

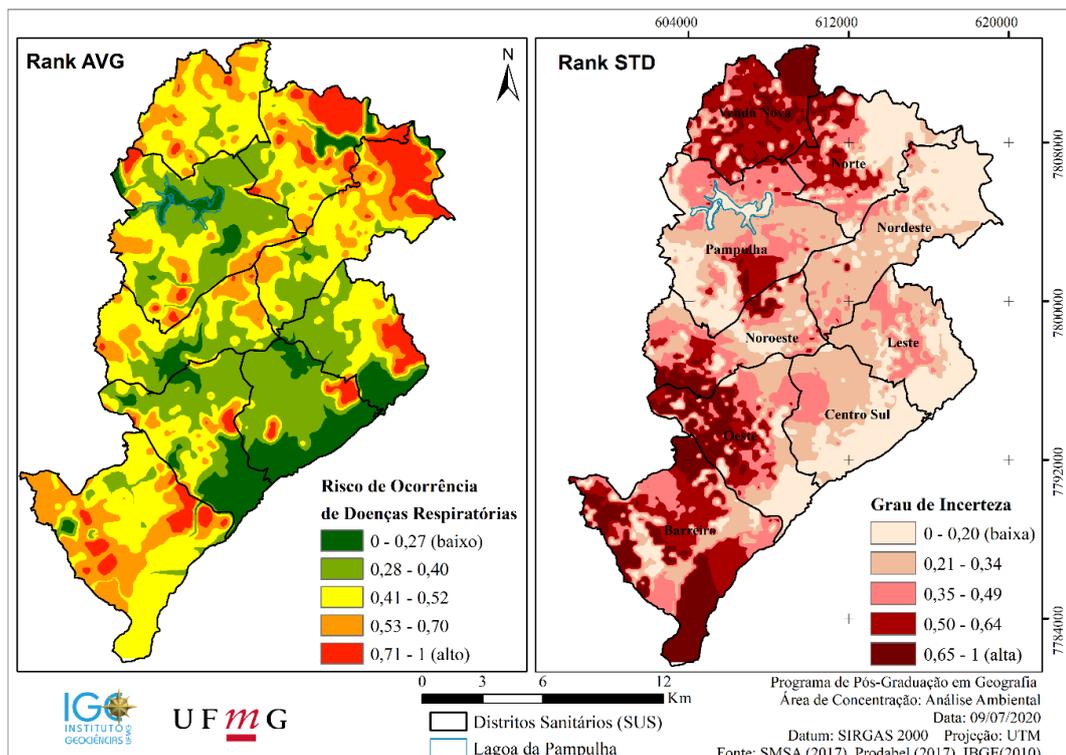
O mapa de risco (Rank AVG) e o mapa de incerteza (Rank STD) permitiram a identificação de regiões críticas de ocorrência de doenças respiratórias, onde a população estudada é mais vulnerável, e regiões em que o risco de agravos é menor. A Figura 3 apresenta o mapa para o mês de janeiro e a Figura 4 para o mês de abril, revelando os resultados dessas duas etapas em aparência normalizada.

Figura 3 - Belo Horizonte (MG): Distribuição espacial dos resultados gerados pela ferramenta Monte Carlo, potencial e incerteza de ocorrência de doenças respiratórias, para o mês de janeiro, 2013-2014.



Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Figura 4 - Belo Horizonte (MG): Distribuição espacial dos resultados gerados pela ferramenta Monte Carlo, potencial e incerteza de ocorrência de doenças respiratórias, para o mês de abril, 2013-2014.



Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Em comparação com os resultados da análise multicritério (AMC), pode-se perceber um maior refinamento entre os limites das áreas com maior risco e menor incerteza, o que buscamos ressaltar neste artigo, ao mesmo tempo que se identifica que nas áreas de baixo risco e menor incerteza são raras as chances de agravos à saúde respiratória das crianças no grupo etário de 0 a 5 anos.

Como resultado da análise combinatória do Rank STD (0 e 1) e do Rank AVG (0 e 2), apontados na seção de metodologia, obtiveram-se as seguintes classes como produto da álgebra de mapas:

0 = Baixo Risco/Menor Incerteza: áreas onde não ocorrem de fato doenças respiratórias, ou onde elas têm baixa incidência;

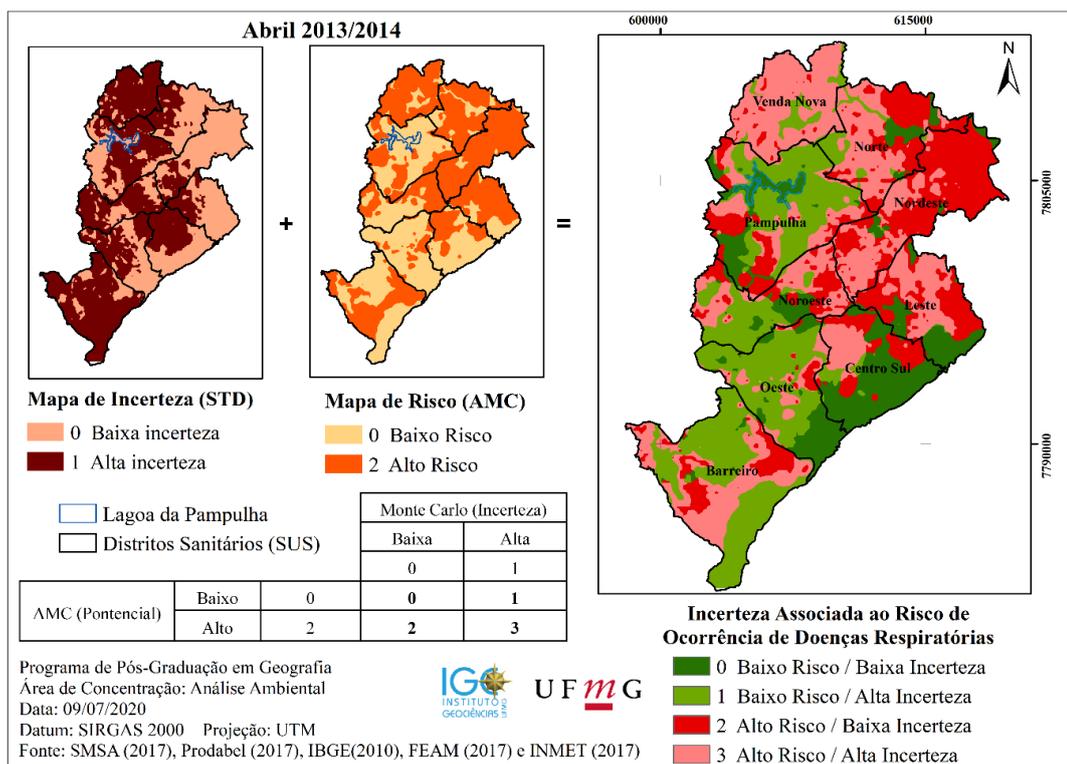
1 = Baixo Risco/Maior Incerteza: áreas onde as doenças não têm potencial para ocorrência, porém há uma incerteza em relação ao seu agravo;

2 = Alto Risco/Menor Incerteza: áreas onde ocorrem de fato as doenças respiratórias e estas necessitam receber uma maior atenção das políticas públicas voltadas para a saúde;

3 = Alto Risco/Maior Incerteza: áreas que exigem estudos mais detalhados e que extrapolam este estudo e variáveis para elas utilizadas.

Como resultado do cotejo e a fim de facilitar a visualização e interpretação dos resultados, têm-se as Figura 5 e Figura 6 a seguir:

Figura 5 - Belo Horizonte (MG): Análise de incerteza associada ao risco de ocorrência de doenças respiratórias, para o mês de janeiro, 2013- 2014.



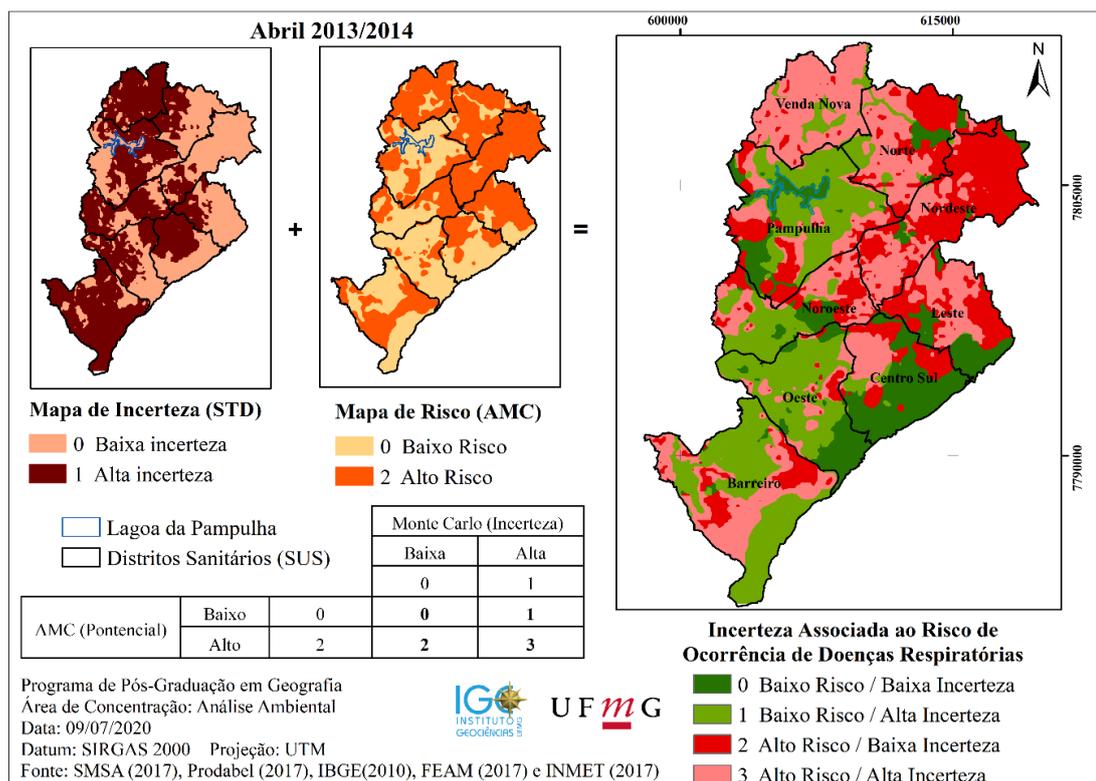
Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Cabe ressaltar que o mês de janeiro apresenta uma distribuição maior de áreas de baixo risco (tons de verde), principalmente aquelas com tons mais escuros, referentes às áreas de baixo risco e baixa incerteza, concentradas nos distritos sanitários Pampulha, Noroeste, Oeste, Centro-sul e Leste. Porém, as áreas de alto risco e baixa incerteza (tons de vermelho) têm o mesmo padrão espacial que os registrados em abril. Essas áreas coincidem com algumas vilas, favelas e ocupações urbanas da capital, que apresentam, ao mesmo tempo, IVS na classificação muito elevado. Elas chamam a atenção para áreas críticas que necessitam de melhorias na atenção à saúde e reforço na promoção da saúde, principalmente a saúde respiratória, independente do período temporal avaliado.

Para o mês de abril, quando há um aumento de atendimentos e internações por doenças respiratórias, nota-se uma redução dos tons de verde e um maior espriamento das cores vermelho (alto risco/baixa

incerteza) e rosa (alto risco/alta incerteza). Essa intensificação das categorias de alto risco manifesta-se principalmente nos distritos sanitários Venda Nova, Norte, Nordeste, Leste e parte do Noroeste, áreas que espacialmente estão associadas às categorias elevado e muito elevado do IVS. Já para o aumento considerável na Centro-Sul, mesmo estando em uma área com IVS baixo, as regiões vermelhas e rosa estão em parte contidas na Avenida do Contorno, centro da cidade, numa região com maior movimentação de veículos e, conseqüentemente, com maior concentração de poluentes e particulados na atmosfera, diretamente relacionados ao mês do ano em que a precipitação e a umidade do ar começam a reduzir pela transição sazonal.

Figura 6 - Belo Horizonte (MG): Análise de incerteza associada ao risco de ocorrência de doenças respiratórias, para o mês de abril, 2013- 2014.



Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Abordando a decomposição de variância das 10.000 matrizes de potencial de ocorrência de doenças respiratórias, apresentam-se a seguir, na Tabela 7 e Tabela 8, os resultados dos índices S e ST. Eles permitem identificar a variável que traz maior ou menor incerteza ao modelo.

Tabela 7 - Belo Horizonte (MG): Resultado da *Variance Decomposition* com 10.000 interações: quantitativo da influência das variáveis na incerteza da aptidão à ocorrência de doenças respiratórias, para o mês de janeiro, 2013-2014.

Variável	S	ST	%S	%ST
Densidade demográfica	-0.002	0.000	-0.2	0.0
Amplitude térmica	0.225	0.222	22.5	21.6
CO	0.020	0.031	2.0	3.0
PM10	0.000	0.016	0.0	1.6
Umidade Relativa	<b>0.719*</b>	<b>0.553*</b>	71.9	53.9
IVS	0.161	0.204	16.1	19.9
			<b>NONL</b>	<b>-12.3</b>

Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Legenda - S: índice de primeira ordem, que corresponde à incerteza de cada variável separadamente; ST: índice de efeito total, que possibilita explicar as interações entre as variáveis e seus respectivos pesos; %S e %ST valores dos respectivos índices em percentual.

Na Tabela 8, apesar de os valores da umidade relativa (\*) indicarem que a variável apresenta maior incongruência, especificamente no mês de janeiro, por trazer maior incerteza ao modelo e baixa interação com as demais variáveis, optou-se por mantê-la devido à sua alta relevância na etapa dos pesos AHP e muito ajustada às análises sinóticas e aos mapas de interpolação.

Em janeiro, é possível identificar que as variáveis que respondem pela menor incerteza são: densidade demográfica, CO e PM10. Em contrapartida, a variável que traz maior incerteza para o modelo é a umidade relativa, seguida da amplitude térmica. As variáveis de maior interação com as demais são: umidade relativa (S= 0.719; ST= 0.553) amplitude térmica (S= 0.225; ST= 0.222) e IVS (S= 0.161; ST= 0.204).

O mês de janeiro, por possuir umidade relativa alta e amplitude térmica baixa, correspondendo a parte do verão, apresenta resultados que condizem com a realidade; por isso essas variáveis não são tão importantes para o agravo de doenças quanto os particulados e a relação com a região de alto IVS e alta densidade demográfica.

Tabela 8 - Belo Horizonte (MG): Resultado da *Variance Decomposition* com 10.000 interações: quantitativo da influência das variáveis na incerteza da aptidão à ocorrência de doenças respiratórias, para o mês de abril, 2013-2014.

Variável	S	ST	%S	%ST
Densidade demográfica	0.003	0.001	0.3	0.1
Amplitude térmica	0.237	0.210	23.7	19.6
CO	0.129	0.227	12.9	21.2
PM10	0.146	0.209	14.6	19.5
Umidade Relativa	0.256	0.347	25.6	32.4
IVS	0.095	0.076	9.5	7.1
			<b>NONL</b>	<b>13.5</b>

Fonte - Elaborada pelos autores (2019).

Legenda - S: índice de primeira ordem, que corresponde à incerteza de cada variável separadamente; ST: índice de efeito total, que possibilita explicar as interações entre as variáveis e seus respectivos pesos; %S e %ST valores dos respectivos índices em percentual.

No mês de abril, a incerteza está associada à umidade relativa (S=25.6%; ST= 32.4%) e à amplitude térmica (S= 23.7%; ST= 19.6%), sendo que a incerteza associada à umidade relativa cai em abril em relação aos valores de janeiro (S=71.9%; ST= 53.9%) e em relação ao conjunto de variáveis. A densidade demográfica e o IVS passam a trazer menos incerteza ao modelo; em contrapartida, possuem menor interação com as demais variáveis. Os particulados PM10 e CO têm comportamento mediano. Cabe ressaltar que os valores de S e ST em abril estão mais próximos entre si se comparados aos valores de janeiro, ou seja, não houve grandes discrepâncias, à exceção das duas variáveis, com origem em dados discretos, densidade demográfica e IVS. Esse comportamento advém, possivelmente, por ser esse mês o de maior agravo à ocorrência de doenças respiratórias, quando as variáveis climáticas têm maior influência sobre as condições de saúde.

É possível concluir que, de maneira geral, as variáveis densidade demográfica e IVS não podem ser retiradas da análise, uma vez que os índices de S e ST confirmam a robustez delas para caracterizar o risco de ocorrência de doenças respiratórias. Todavia, a variável umidade relativa agrega incerteza ao modelo, o que poderia justificar a sua retirada da análise. Cabe pontuar que a assertividade na escolha das variáveis foi satisfatória, pois todos os valores ficaram abaixo de zero. Os erros residuais do valor de S (NONL) foram baixos e os dados tiveram uma boa interação.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o suporte metodológico aqui adotado, foi possível efetuar a espacialização dos dados e a produção de combinações cartográficas capazes de contribuir para uma melhor compreensão dos

lugares de ocorrência das doenças respiratórias, predominâncias e riscos, para a população estudada, no espaço selecionado e no período temporal determinado.

Tal conjunto de produção cartográfica, resultado da modelagem espacial, pode tornar-se ferramenta estratégica para auxiliar os gestores do território urbano, elaboradores e executores de políticas públicas em saúde, na tomada de decisão, seja no plano de ação conjunta, na prevenção, tratamento e/ou sensibilização de segmentos populacionais. Assim, estamos de acordo com a metodologia defendida por Assunção et al. (1998), ao afirmarem que os mapas são importantes instrumentos na análise espacial do risco de determinada doença.

As análises desses mapas temáticos no presente artigo resultaram em reflexões para além dos elementos ambientais. Elas coadunam com a declaração da Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2008), que afirma que o clima, entre outros fatores, pode suscitar a manifestação de determinadas doenças, nesse caso em escala local. Esse conjunto de resultados suscitaram hipóteses acerca de suas interações com a escala humana e, conseqüentemente, socioeconômica, conforme foram aventadas também por Dahlgren e Whitehead (1991), CNDSS (2008), Caiaffa et al. (2008), Barcellos et al. (2009), Fonseca e Vasconcelos (2011), Antunes et al. (2013), Bastos (2014) e Dimenstein e Siqueira (2020).

Conclui-se que elementos do clima (variações de temperatura, baixa umidade relativa do ar, redução da precipitação, emissão e concentração de poluentes no ar) e alguns tipos de organizações socioespaciais (zonas de baixa renda, próximas de complexos industriais e classificadas como vulneráveis) sofrem maiores agravos diante da ocorrência de doenças respiratórias.

A partir desse conjunto de análises, foi possível observar que os fatores saúde-doenças não constituem um processo linear; eles podem ser mais bem esclarecidos quando associados a reflexões geográficas, que sempre estão envolvidas com o espaço, o tempo, os processos e as escalas, fundamentais para localizar (onde e quando), descrever (como) explicar (porque) e interpretar (porque) uma situação ou fenômeno que ocorre ali.

Nesse sentido, espera-se que, com os resultados deste estudo, seja mais explícita a importância da adoção da modelagem ambiental para análises das interações do ambiente urbano com desfechos em saúde, ressaltando o olhar especial para a ocorrência de doenças respiratórias em crianças de 0 a 5 anos na cidade de Belo Horizonte (MG).

## AGRADECIMENTOS

Este artigo contém reflexões realizadas pelos autores no âmbito da dissertação de mestrado da primeira autora. Agradecemos o Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Geociências da UFMG; e à FAPEMIG pelo fornecimento da bolsa de estudo.

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, F. P.; COSTA, M.C.N.; PAIM, J.S.; VIEIRA-DA-SILVA, L.M.; SANTOS, C.A.S.T.; CRUZ, A.A.; NATIVIDADE, M.; BARRETO, M.L. Desigualdades sociais na distribuição espacial de hospitalizações por doenças respiratórias. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 7, p. 1346-1356, jul. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2013000700009>
- ASSIS, W. L. O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmico-espacial. 299p. **Tese** (Doutorado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
- ASSIS, W. L.; PARIZZI, M. G.; RIBEIRO, S. M. Identificação dos sistemas atmosféricos responsáveis por inundações e deslizamentos no município de Belo Horizonte: análise dos períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013. **Revista Geografias**, p. 38-55, 2013. <https://doi.org/10.35699/2237-549X..13360>
- ASSUNÇÃO, R. M.; BARRETO, S.M.; GUERRA, H.L.; SAKURAI, E. Mapas de taxas epidemiológicas: Uma abordagem Bayesiana. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 14, p. 713-723, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X1998000400013>

BARCELLOS, C.; MONTEIRO, A. M. V.; CORVALÁN, C.; GURGEL, H. C.; CARVALHO, M. S.; ARTAXO, P.; HACON, S.; RAGONI, V. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742009000300011>

BARROZO, L. V. Contribuições da cartografia aos estudos de geografia da saúde: investigando associações entre padrões espaciais. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, Volume Especial Cartogeo, p. 413-425, 2014. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0i0.549>

BASTOS, L. G. **Caracterização Topoclimática do Aglomerado da Serra**: a Associação do Clima com a Ocorrência de Problemas Respiratórios em Crianças. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal de Saúde de Belo Horizonte (SMSA). Assessoria de Tecnologia e Informação em Saúde (ASTIS). **[Informações relacionadas a doenças respiratórias solicitadas diretamente à SMSA]**. 2019.

BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal de Saúde (SMSA). **Gerência de Epidemiologia e Informação (GEEPI)**. 2017.

BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal de Saúde (SMSA). **Índice de Vulnerabilidade à Saúde 2012**. Belo Horizonte: 2013. Disponível em: [https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/saude/2018/publicacoes-da-vigilancia-em-saude/indice\\_vulnerabilidade2012.pdf](https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/saude/2018/publicacoes-da-vigilancia-em-saude/indice_vulnerabilidade2012.pdf). Acesso em: 28 jun. 2018.

BUBALO, M.; VAN ZANTEN, B. T.; VERBURG, P. H. Crowdsourcing geo-information on landscape perceptions and preferences: A review. **Landscape and Urban Planning**, v. 184, p. 101-111, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.01.001>

BRASIL. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Belo Horizonte. 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>> Acesso: 14 de julho de 2022.

BROWN, G. Engaging the wisdom of crowds and public judgement for land use planning using public participation geographic information systems. **Australian Planner**, v. 52, n.3, p. 199-209, 2015.

<https://doi.org/10.1080/07293682.2015.1034147>

CAIAFFA, W. T.; FERREIRA, F. R.; FERREIRA, A. D.; OLIVEIRA, C. Di L.; CAMARGOS, V. P.; PROIETTI, F. A. Saúde urbana: "a cidade é uma estranha senhora, que hoje sorri e amanhã te devora". **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 6, p. 17785-1796, 2008.

<https://doi.org/10.1590/S1413-81232008000600013>

CATÃO, R. C.; REOLON, C. A.; MIYAZAKI, V. K. Interações Espaciais: Uma Reflexão Temática. **Caminhos de Geografia (UFU)**, v. 11, p. 231-239, 2010. <https://doi.org/10.14393/RCG113516340>

COSTA, H. G. Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão. In: SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 36. 2004, São João Del Rei, MG. **Anais...** São João Del Rei: 23 a 26 nov. 2004. p. 1-122. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2004/pdf/arq0279.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2018.

COMISSÃO NACIONAL SOBRE DETERMINANTES SOCIAIS DA SAÚDE (CNDSS). **As causas sociais das iniquidades em saúde no Brasil**. Relatório Final da Comissão Nacional sobre Determinantes Sociais da Saúde. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2008. Disponível em: [https://portal.fiocruz.br/sites/portal.fiocruz.br/files/documentos/livro\\_determinantes.pdf](https://portal.fiocruz.br/sites/portal.fiocruz.br/files/documentos/livro_determinantes.pdf). Acesso em: 10 mar. 2019.

CZEPKIEWICZ, M.; JANKOWSKI, P.; MLODKOWSKI, M. Geo-questionnaires in urban planning: Recruitment methods, participant engagement, and data quality. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 44, n. 6, p. 551-567, 2017. <https://doi.org/10.1080/15230406.2016.1230520>

DAHLGREN, G.; WHITEHEAD, M. **Policies and Strategies to promote social equity in health**. Stockholm: Institute for Future Studies; 1991.

- DIMENSTEIN, M.; SIQUEIRA, K. Urbanização, modos de vida e produção da saúde na cidade. **ECOS-Estudos Contemporâneos da Subjetividade**, v. 10, n. 1, p. 61-73, 2020.
- FONSECA, F. R.; VASCONCELOS, C.H. Estudo da distribuição de doenças respiratórias no estado de Santa Catarina, Brasil. **Cadernos de Saúde Coletiva**, v. 19, n. 4, p. 454-460, 2011.
- FREITAS, C. R. Tecnologias de Geoinformação no planejamento territorial: novas formas de produção, compartilhamento e uso de dados espaciais. 262 p. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, **Tese** (Arquitetura e Urbanismo) 2020.
- FONSECA, B. M. **Conceitos e práticas de geodesign aplicados ao ordenamento territorial do município de São Gonçalo do Rio Abaixo**. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- FONSECA, F. R.; VASCONCELOS, C. H. Estudo da distribuição de doenças respiratórias no estado de Santa Catarina, Brasil. **Cadernos de Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 454-460, 2011.
- GUIMARÃES, R. B.; CATÃO, R. de C.; NOSSA, P. N. Geografia a serviço da emergência em saúde pública. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, ed Esp, p. 1-4, 2020. <https://doi.org/10.14393/Hygeia0056356>
- GURGEL, H.; BELLE, N. (org.). **Geografia e saúde: teoria e método na atualidade**. Brasília: Universidade de Brasília, 2019.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados horários de quatro estações meteorológicas (Lourdes, Pampulha, Ibirité e Cercadinho), anos 2013 e 2014**. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Setores censitários e dados de população de Belo Horizonte. 2018.
- JANKOWSKI, P. L. Análise de sensibilidade espacial para avaliação de aptidão da terra: SASE. In: MOURA et al. (org.). **Tecnologias de geoinformação para representar e planejar o território urbano**. Rio de Janeiro: Interciência, p. 115-132, 2016.
- JANKOWSKI, P.; NAJWER, A.; ZWOLIŃSKI, Z.; NIESTEROWICZ, J. GEODIVERSITY assessment with crowdsourced data and spatial multicriteria analysis. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 12, p. 716, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120716>
- HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey**. New York: Springer-Verlag, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- LIGMANN-ZIELINSKA, A.; JANKOWSKI, P.; WATKINS, J. Spatial Uncertainty and Sensitivity Analysis for Multiple Criteria Land Suitability Evaluation. Extended Abstract. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE, 7., 2012, Columbus, OH, U.S. **Anais...** Columbus, OH, U.S.:, p. 18-21, sept., 2012
- LIGMANN-ZIELINSKA, A.; JANKOWSKI, P. Spatially-explicit integrated uncertainty and sensitivity analysis of criteria weights in multicriteria land suitability evaluation. **Environmental Modelling & Software**, v. 57, p. 235-247, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.007>
- LIGMANN-ZIELINSKA, A.; SUN, L. Applying Time Dependent Variance-Based Global Sensitivity Analysis to Represent the Dynamics of an Agent-Based Model of Land Use Change. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 24, n. 12, p. 1829-1850, 2010. <https://doi.org/10.1080/13658816.2010.490533>
- MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: Wiley, 1999.
- MALCZEWSKI, J. On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. **Transactions in GIS**, v.4, p.5-22, 2002. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
- MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, v. 62, p.3-65, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, p.703-726, 2006.  
<https://doi.org/10.1080/13658810600661508>

MARANDOLA JR., E.; HOGAN, D. J. Vulnerabilidade do lugar vs. Vulnerabilidade sociodemográfica: implicações metodológicas de uma velha questão. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, p. 161-181, jul. 2009.

MARTINS, F. G.; COELHO, L. S. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. **GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, ano 7, n. 1, p. 65-80, jan.-mar. 2012.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). Diretoria de Gestão da Qualidade e Monitoramento Ambiental. Gerência de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões. **[Dados de quatro estações meteorológicas (Amazonas, Av. Contorno, CAMG, Cidade Industrial e Piratininga), 2013-2014]**. Belo Horizonte: 2018. CD.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (BR). Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. **Doenças respiratórias crônicas**. Brasília: Ministério da Saúde, 2010. (Série A. Normas e Manuais Técnicos); (Cadernos de Atenção Básica, 25).

MONTE-MÓR, R. L. **Belo Horizonte: espaços e tempos em construção**. Coordenado por Roberto Luís Monte-Mór. Belo Horizonte: CEDEPLAS/PBH, 94 p.: il – Coleção BH 100 anos, 1994.

MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. 2. ed. Belo Horizonte: Ed. da autora, 2005.

MOURA, A. C. M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. In: SBSR- SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 2899-2906.

MOURA, A. C. M.; JANKOWSKI, P. Contribuições aos estudos de análises de incertezas como complementação às análises multicritérios - "Sensitivity analysis to suitability evaluation". **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 4, p. 665-684, 2016. <https://doi.org/10.14393/rbcv68n4-44274>

NAJWER, A.; JANKOWSKI, P.; NIESTEROWICZ, J.; ZWOLIŃSKIA, Z. Geodiversity assessment with global and local spatial multicriteria analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 107, p. 102665, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102665>

NEISANI SAMANI, Z.; KARIMI, M.; ALESHEIKH, A. Environmental and infrastructural effects on respiratory disease exacerbation: a LBSN and ANN-based spatio-temporal modelling. **Environmental monitoring and assessment**, v. 192, n. 2, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7987-x>

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). **Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos na saúde: cenários e incertezas para o Brasil**. Brasília (DF): 2008.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL). **Base Cadastral PRODABEL**. Belo Horizonte: 2017.

RADICCHI, A. L. A. A poluição na bacia aérea da região metropolitana de Belo Horizonte e sua repercussão na saúde da população. **Revista Brasileira de Estudos de População**, São Paulo, v. 29, n. 1, jan.-jun. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0102-30982012000100013>

RESER, A. R. O uso do geoprocessamento como ferramenta para o planejamento no campo da saúde: uma revisão da literatura. 59p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, **Trabalho de conclusão de especialização**, 2021.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. N. York: McGraw-Hill, 1980.  
<https://doi.org/10.21236/ADA214804>

SALDANHA, R. F.; BARCELLOS, C.; PEDROSO, M. M. Ciência de dados e big data: o que isso significa para estudos populacionais e da saúde?. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 29, p. 51-58, 2021. <https://doi.org/10.1590/1414-462x202199010305>

SALES, D. M.; ASSIS, W. L.; FONSECA, B. M. Clima urbano e saúde: elementos climáticos e doenças respiratórias observadas no município de Belo Horizonte (MG) entre 2013 e 2014. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.61035>

SALTELLI, A.; ANNONI, P.; AZZINI, I.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M.; TARANTOLA, S. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. **Computer Physics Communications**, v. 181, n. 2, p. 259-270, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>

SAMULOWSKA, M.; CHMIELEWSKI, S.; RACZKO, E.; LUPA, M.; MYSZKOWSKA, D.; ZAGAJEWSKI, B. Crowdsourcing without data bias: Building a quality assurance system for air pollution symptom mapping. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 10, n. 2, p. 46, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020046>

SILVEIRA, P. O. Índice de vulnerabilidade ao contágio de doenças respiratórias da população da Região Metropolitana de Porto Alegre, RS. 50p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, **Trabalho de conclusão de especialização**, 2019.

SOUZA, E. C. O.; SANTOS, E. S. ROSA, A. M.; BOTELHO, C. Varredura espaço-temporal para identificação de áreas de risco para hospitalização de crianças por asma em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 22, 2019. <https://doi.org/10.1590/1980-549720190019>

UBILLA, C.; YOHANNESSEN, K. Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. **Revista Médica Clínica Las Condes**, v. 28, n. 1, p. 111-118, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003>

XAVIER-DA-SILVA, J.; PERSSON, V. G.; LORINI, M. L.; IERVOLINO, P.; RIBEIRO, M. F.; ABDO, O. E. COSTA, A. J. S. T.; BERGAMO, R. B. A. Índices de Geodiversidade: aplicações de SGI em estudos de biodiversidade. In: GARAY, Irene; DIAS, Braulio (org.). **Conservação da Biodiversidade em Ecossistemas Tropicais**. Petrópolis: Vozes, p. 299-316, 2001.

---

Recebido em: 28/09/2021

Aceito para publicação em: 03/08/2022