

Impacto das mudanças climáticas e da qualidade do ar em hospitalizações por doenças respiratórias em municípios da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Brasil

Impact of climate change and air quality on hospitalizations for respiratory diseases in municipalities in the Metropolitan Region of São Paulo (MRSP), Brazil

Danilo Vassari-Pereira (<https://orcid.org/0000-0003-4760-1439>)¹

María Cleofé Valverde (<https://orcid.org/0000-0003-1439-5325>)¹

Gabriela Farias Asmus (<https://orcid.org/0000-0002-8113-2456>)¹

Abstract *The scope of this study was to analyze the possible impacts of climate change on respiratory health in the municipalities of Santo André and São Caetano do Sul. Historical meteorological data (temperature, precipitation, relative humidity and atmospheric pressure), air quality data (concentrations of PM₁₀ and O₃) and respiratory health data (incidence rates of hospitalizations for respiratory diseases - IRHRD) were related through statistical models of Multiple Linear Regression (MLR). Meteorological data from future climate projections (2019-2099) from three different climate models (one global and two regionalized) in two emission scenarios were applied to the MLR models. The results showed that the IRHRD will suffer an increase of up to 10% in relation to the current levels for São Caetano do Sul in the 2070-2099 period. In Santo André, projections indicated a reduction of up to 26% in IRHRD. The most important variable in the MLR models for Santo André was temperature (-2,15x), indicating an inverse relationship between global warming and an increase in IRHRD, while in São Caetano the atmospheric pressure had the greatest weight (2.44x). For future studies, the inclusion of future projections of PM10 concentrations is recommended.*

Key words *Climate change, Respiratory diseases, Air pollutants, Environmental health, Multiple linear regression*

Resumo *Este estudo teve por objetivo analisar os possíveis impactos das mudanças climáticas na saúde respiratória nos municípios de Santo André e São Caetano do Sul. Foram analisados dados meteorológicos históricos (temperatura, precipitação, umidade relativa e pressão atmosférica), de qualidade do ar (concentrações de MP₁₀ e O₃) e de saúde respiratória (taxas de incidência de internações por doenças respiratórias - TIIDR), relacionados através de modelos estatísticos de Regressão Linear Múltipla (RLM). Dados meteorológicos de projeções climáticas futuras (2019-2099) de três modelos climáticos (um global e dois regionalizados) em dois cenários de emissão foram aplicados aos modelos de RLM. Os resultados das projeções mostraram um aumento de até 10% nas TIIDR em relação aos níveis atuais para São Caetano do Sul no período de 2070-2099. Em Santo André as projeções indicaram redução de até 26% nas TIIDR. A variável de maior peso nos modelos de RLM de Santo André foi a temperatura (-2,15x) indicando que o aquecimento é inversamente proporcional ao aumento nas TIIDR, enquanto em São Caetano do Sul a pressão atmosférica teve o maior peso (2,44x). Para próximos trabalhos recomenda-se a inclusão de projeções futuras de concentrações de poluentes atmosféricos.*

Palavras-chave *Mudanças climáticas, Doenças respiratórias, Poluentes atmosféricos, Saúde ambiental, Regressão Linear Múltipla*

¹ Universidade Federal do ABC. Av. dos Estados 5001, Bangú. 09210-580 Santo André SP Brasil.
danilo.vassari@gmail.com

Introdução

As mudanças climáticas podem ser definidas como variações estatisticamente significativas nos padrões de precipitação, temperatura, ventos ou outros fenômenos meteorológicos, para um período relativamente extenso de tempo¹. As emissões antrópicas de aerossóis e gases oriundos da queima de combustíveis fósseis têm sido reconhecidas como a principal causa das mudanças climáticas globais, embora as emissões naturais também contribuam para as alterações observadas ao longo do século XX². Dentre estas alterações destacam-se o aumento da temperatura média global, o derretimento das calotas polares, o aumento do nível dos mares e maior ocorrência de eventos extremos e desastres naturais³. Como consequências estimam-se prejuízos aos ecossistemas, biodiversidade, culturas e sociedades.

Os impactos das mudanças climáticas atingem também no campo da saúde. Exemplos são os problemas de segurança alimentar e o possível aumento de desnutrição, a difusão de doenças diarreicas e transmitidas por vetores, intensificação dos problemas respiratórios por condições ambientais, além de conflitos, ferimentos, mortes devido à exposição a condições climáticas extremas como secas e ondas de calor⁴. Tais impactos podem afetar diferentes grupos, especialmente os mais vulneráveis, considerando faixas etárias iniciais e finais (infância e velhice), além de outros fatores.

Os efeitos das mudanças climáticas sobre a saúde humana podem ser divididos em três mecanismos: direto, indireto e social⁵. Um possível efeito direto é o estresse fisiológico por ondas de calor. Hacon *et al.*⁶ avaliaram modelos climáticos para projeções de cenários futuros na escala municipal, e encontraram que até 2099 a temperatura pode aumentar 4°C na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), repercutindo diretamente no conforto e bem-estar de seus habitantes. Já o efeito indireto pode ser representado por alterações na qualidade do ar por questões climáticas, como no estudo de D'Amato *et al.*⁷ que identificou o aumento das alergias e doenças respiratórias em cidades europeias causadas por partículas alergênicas associadas a mudanças do clima. Por fim, o efeito social engloba casos de migrações por conflitos de origem climática. Esse é o caso da malária no Maranhão a partir da década de 1980, causada após o retorno dos trabalhadores locais que haviam migrado para a Amazônia devido à seca no estado⁸.

No ambiente urbano, a atuação dos poluentes atmosféricos é de extrema relevância para a

saúde pública. Segundo a Organização Mundial da Saúde⁹, 60% das doenças respiratórias agudas e 50% das doenças respiratórias crônicas estão associadas à exposição a poluentes atmosféricos. Estima-se que só na RMSP a poluição atmosférica seja responsável por 7 mil mortes por ano¹⁰. Em regiões densamente industrializadas, relações de poluição com doenças tem sido objeto de estudo^{11,12}. Entretanto, a análise da saúde respiratória em áreas urbanas não se limita à poluição atmosférica, mas envolve os efeitos que o clima pode trazer à dinâmica dos poluentes.

Um estudo de 2019 encontrou relações estatísticas significativas entre a poluição do ar (através de material particulado) e variáveis meteorológicas (temperatura média do ar, umidade relativa do ar e precipitação) e com internações respiratórias de crianças em São Paulo¹³. Já Coelho *et al.*¹⁴ desenvolveu um modelo estatístico com dados meteorológicos, de qualidade do ar e de morbidade que fosse capaz de prever internações hospitalares de crianças e jovens associadas a problemas respiratórios na cidade de São Paulo. Contudo, poucos estudos têm sido realizados considerando projeções futuras das mudanças climáticas e seus impactos na saúde.

Nesse contexto e, com foco no 13º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sobre ação contra a mudança global do clima¹⁵, o presente trabalho teve por objetivo analisar o impacto das mudanças climáticas na saúde respiratória dos habitantes de Santo André e São Caetano do Sul, municípios localizados na RMSP, com a finalidade de diagnosticar conexões entre alterações do clima com saúde respiratória e projetar cenários futuros a partir de modelagem estatística, agregando conhecimento para a região.

Metodologia

Área de estudo

Os municípios de Santo André e São Caetano do Sul estão localizados na região do Grande ABC Paulista, na porção sudeste da RMSP (Figura 1). A região ocupa uma área de aproximadamente 828 km² onde vivem por volta de 2,7 milhões de habitantes, sendo 710 mil habitantes distribuídos em 175 km² em Santo André e 160 mil pessoas vivendo em 15 km² em São Caetano do Sul¹⁶. Devido a sua proximidade com a capital e com o porto de Santos, a partir da década de 1950s municípios do Grande ABC Paulista passaram por grande desenvolvimento industrial,

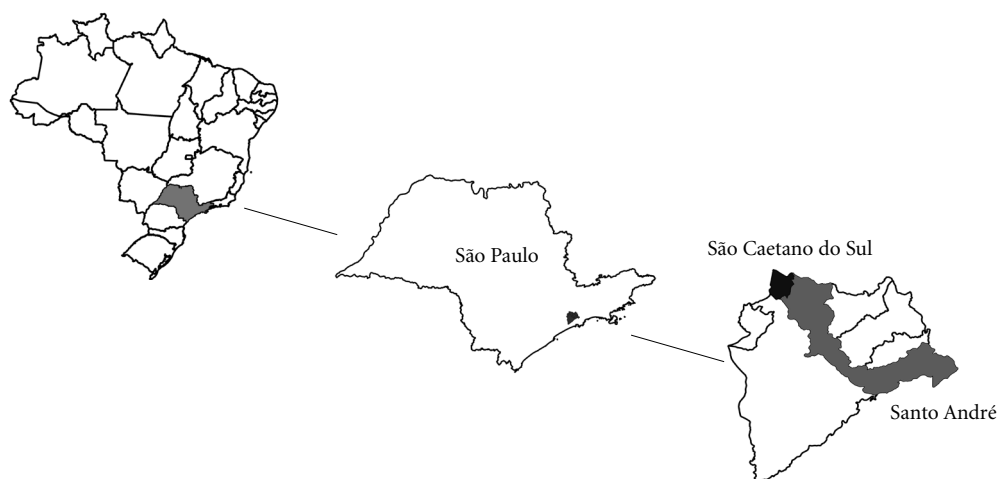


Figura 1. Localização da Região do Grande ABC Paulista em São Paulo, com destaque para Santo André e São Caetano do Sul.

Fonte: Autores, 2022.

principalmente nos segmentos automobilístico (ao longo da via Anchieta) e petroquímico (no Polo de Capuava)¹⁶.

Os municípios situam-se no Planalto Paulista e tem clima de características predominantemente tropicais e subtropicais. As médias de temperatura são entre 15°C e 24°C e os índices pluviométricos médios anuais estão em torno de 1.350 mm. A região está inserida no domínio da Mata Atlântica, integra a Bacia Hidrográfica do Alto do Tietê, e abriga a Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings, considerado o maior reservatório de águas da RMSP¹⁶. Na área urbana destaca-se o rio Tamanduateí, como uma extensão de 35 km e área de drenagem de 320 km², cuja várzea foi intensamente ocupada¹⁷.

No presente trabalho foram coletados e analisados três tipos de dados: meteorológicos (observados e simulados), de qualidade do ar e de saúde respiratória.

Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos observados, na escala mensal, foram a temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica, obtidos do Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André (SEMASA), da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e do Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo (SAISP) no período de 2011 a 2018. Dados de precipitação foram obtidos do Departamento de

Águas e Energia Elétrica (DAEE) no período de 1999 a 2018. Essa diferença no intervalo de tempo está associada à disponibilidade dos dados nas respectivas fontes.

Os dados meteorológicos simulados utilizados foram a temperatura do ar a 2 m, umidade relativa do ar a 2 m, pressão atmosférica à superfície e precipitação total, tanto para o clima presente (histórico) quanto para cenários futuros de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5 obtidos de 3 modelos climáticos diferentes, sendo 1 global e 2 regionais. Os *Representative Concentration Pathways* (RCP) são cenários de emissões que representam diferentes trajetórias de concentração dos GEE no clima futuro, baseados na mudança no balanço radiativo no topo da atmosfera¹⁸. Os RCP 4.5 e RCP 8.5 são as opções disponíveis nos modelos climáticos utilizados e representam respectivamente, um cenário de aquecimento intermediário e pessimista.

O modelo global escolhido foi o CMCC-CM, de resolução 82,3 x 82,5 km e original do *Centro Euro Mediterrâneo on Climate Change*, na Itália¹⁹. As simulações do CMCC-CM fazem parte do *Coupled Model Intercomparison Project phase 5* (CMIP5), desenvolvido para promover melhorias no conhecimento das mudanças climáticas para modelos globais de circulação atmosfera-oceano acoplados, além de apoiar em avaliações nacionais e internacionais das mudanças climáticas²⁰. O CMIP5 é utilizado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)

e disponibiliza seus dados no *website* do *World Climate Research Programme*²¹.

Já os modelos regionais escolhidos foram o Eta-HadGEM2-ES e o Eta-MIROC5, com resolução de 05 x 05 km e 20 x 20 km, respectivamente¹⁸. O modelo regional Eta é utilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CP-TEC) para previsão de tempo e clima no Brasil. Uma versão do modelo regional Eta foi adaptada para gerar projeções de mudanças climáticas, utilizando condições de contorno de dois modelos globais do CMIP5 (HadGEM2-ES ou MIROC5). As projeções desse modelo para o clima futuro de 2010-2099 foram utilizadas para apoiar tanto a Segunda quanto a Terceira Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC e seus dados estão disponíveis na plataforma PROJETA²²⁻²⁴.

Dados de qualidade do ar

Os dados de qualidade do ar utilizados foram material particulado inalável (MP_{10}) e ozônio troposférico (O_3) no período de 1998 a 2018, medidos na estação de qualidade de ar chamadas “São Caetano do Sul” e “S. André - Capuava” da CETESB e disponibilizados via Sistema de dados de Qualidade do Ar (QUALAR). Os dados de qualidade do ar foram coletados com base horária.

Séries de dados com lacunas ou falhas só foram utilizadas caso atendessem ao critério de representatividade acima de dois terços do total, não podendo ser as lacunas ou falhas consecutivas²⁵. Logo, as análises médias anuais só eram realizadas se houvesse no mínimo 8 meses de dados válidos; nas médias mensais, mínimo de 20 dias e nas médias diárias, mínimo de 16 horas. Do contrário, os dados foram desconsiderados.

Dados de saúde respiratória

Os dados de saúde respiratória utilizados foram as internações do grupo de doenças do aparelho respiratório (CID 10 - Capítulo X) no período de 1998 a 2018. Os mesmos foram coletados através do sistema TABNET do DATASUS, onde se encontram os dados do Sistema de Internações Hospitalares do Sistema Único de Saúde (SIH/SUS). O capítulo X do CID 10 inclui as doenças do grupo de infecções das vias aéreas superiores (sinusite, faringite, rinite) e inferiores (bronquite, asma, influenza e pneumonia), além de outras doenças das vias aéreas²⁶. As informações foram coletadas com periodicidade mensal por município de residência. O número anual de habitantes em cada município analisado foi ex-

traído da seção de Informações Demográficas e Socioeconômicas do DATASUS.

Os dados de saúde foram apresentados sob o formato de taxas de incidência mensal, sazonal e anual por município. Para a criação da taxa, foi utilizada a seguinte fórmula (1):

Taxa de incidência = (nº de registros de internação por doenças respiratórias/ nº de habitantes) * 100.000 (1)

As taxas de incidência foram organizadas contemplando grupos específicos de doenças respiratórias. Assim, taxa de incidência “Geral” inclui todos os registros de doenças respiratórias reconhecidas pelo CID-10. A taxa de incidência “Sem Influenza” contabiliza o número de casos de doenças respiratórias, exceto os casos de Influenza. Já a taxa de incidência “Top 3” foi composta somente com os registros de Asma, Bronquite aguda e Pneumonia. Tal escolha teve como base a maior sensibilidade dessas 3 doenças (quando comparada com as outras do trato respiratório) mediante à exposição à poluentes atmosféricos, principalmente MP_{10} e O_3 ²⁷.

Análises

As taxas de incidência foram associadas às variáveis atmosféricas e de poluição atmosférica na construção de um modelo empírico através da construção de um modelo de Regressão Linear Múltipla (RLM). Nesse modelo estatístico, as taxas de incidência das doenças respiratórias foram consideradas variáveis de interesse (dependentes), enquanto as variáveis explicativas (independentes) são os dados atmosféricos observados (temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica, precipitação) e estimados (SPI) assim como os dados de qualidade do ar.

O SPI é o *Standardized Precipitation Index* e quantifica extremos em diferentes escalas de tempo em possíveis períodos de déficit ou excesso de precipitação, correspondendo respectivamente a períodos de secas (com valores entre -2 e 0) ou de chuvas excessivas (com valores entre 0 e +2)^{28,29}.

O objetivo da análise de RLM é encontrar uma equação que modele a melhor resposta da variável de interesse a partir de uma combinação das variáveis explicativas³⁰. A equação da RLM é dada a seguir (2):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (2)$$

Onde, y é a variável de interesse a ser modelada x_i são as variáveis explicativas, com $i=1, 2, \dots, n$; β_0 indica o valor de y quando as variáveis expli-

cativas são equivalentes a zero; β_i são coeficientes de regressão, que medem o peso das variáveis explicativas na variável y ; ε corresponde ao erro de previsão (diferença entre valores reais e previstos da variável y).

Os dados utilizados na construção do modelo de RLM foram de 2011 a 2018 para Santo André e de 2012 a 2018 para São Caetano do Sul, conforme a disponibilidade de cada município. As variáveis explicativas (x_i) foram organizadas de duas formas. A primeira, envolvendo somente variáveis meteorológicas: temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação e SPI. A segunda apresenta as variáveis anteriores seguidas das variáveis de qualidade do ar: concentração de MP_{10} e de O_3 , nº de dias acima do padrão para MP_{10} e O_3 . Somente o primeiro conjunto de variáveis foi utilizado para os cenários futuros, pois a modelagem com o segundo conjunto estava fora do escopo deste trabalho dado que os modelos climáticos escolhidos não possuem tais dados futuros.

Na verificação dos modelos de RLM, o principal critério para decidir a combinação mais adequada foram os coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2), que indicam a relação entre os valores das variáveis em uma amostra³¹. Os valores de r e r^2 variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste³².

Outras verificações importantes nos modelos de RLM são a multicolinearidade e a significância estatística. No primeiro caso as variáveis explicativas estão correlacionadas entre si, podendo impactar negativamente nos coeficientes de regressão. Para evitar isso, foi aplicado o método de Fator Inflacionário de Variância³³. Já o segundo consiste na relação funcional e relevante entre a variável de interesse e as variáveis explicativas. Para avaliar isso, utilizou-se o teste F ³³.

Após a construção do modelo de RLM, este foi validado e utilizaram-se três métricas: o viés médio (VM), o erro absoluto médio (EAM) e a raiz do erro quadrático médio (REQM)³⁴.

A partir do melhor modelo de RLM construído, procedeu-se a aplicá-los nas simulações de cenários futuros de modelos climáticos. No entanto, como os dados dos modelos climáticos são simulados, antes de sua utilização estes devem primeiro ser validados (históricos) e posteriormente ajustados (cenários futuros)³⁵. Dessa forma, a incerteza associada à simulação histórica dos modelos climáticos foi avaliada com base nos dados observados, para detectar os erros sistemáticos, utilizando-se o VIES e a correlação de anomalias³⁶.

Tendo avaliado a incerteza dos modelos climáticos, procedeu-se com a remoção do erro sistemático médio mensal utilizando a técnica de correção *Direct Approach* (Aplicação Direta), que detecta as diferenças entre as condições climáticas atuais e as condições simuladas pelo modelo climático e aplica tais diferenças para a série futura através de um fator de correção^{35,36}.

Assim, foi empregado o fator de correção nas variáveis simuladas para ambos RCPs dos modelos climáticos até o ano de 2099, de forma a remover o erro sistemático, diminuindo as incertezas das projeções. Em seguidas variáveis simuladas corrigidas foram utilizadas nos modelos de RLM como variáveis explicativas, de forma a visualizar as taxas de incidência de internação por doenças respiratórias nas projeções de mudanças climáticas em diferentes cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5) e para os diferentes modelos climáticos.

Os resultados gerados nessa etapa foram analisados em três períodos diferentes: de 2019 a 2040, de 2041 a 2070 e de 2071 a 2099, conforme usual na literatura^{18,23,37}.

Resultados e discussão

Taxas de incidência de internações por doenças respiratórias e relação com qualidade do ar

A seguir, são apresentadas as taxas de incidência anual de internação por doenças respiratórias para os municípios no período de 1998-2018 (Figura 2). O maior valor registrado foi 961 casos/100 mil habitantes em 2006 para São Caetano do Sul, enquanto o menor foi 265 casos/100 mil habitantes em 2002 para Santo André. As taxas de incidências de São Caetano do Sul concentram-se em faixas superiores às de Santo André (de 500 a 900 e de 200 a 500, respectivamente).

Essa diferença pode estar relacionada às emissões veiculares e seus impactos na saúde. São Caetano do Sul é o menor município do Grande ABC Paulista, porém tem a segunda maior densidade demográfica (9.736 habitantes/km²)³⁸. Em simulações de quatro modelos de transporte, esse município teve o maior índice de emissões veiculares por km de viário na região³⁹. Outro estudo identificou que para um aumento de concentração de MP_{10} , São Caetano do Sul apresenta maior tendência de internações por doenças respiratórias do que Santo André⁴⁰.

Estudos anteriores identificaram que a concentração média anual de MP_{10} tem reduzido des-

de 2012 em ambos os municípios, sendo as concentrações maiores em São Caetano do Sul⁴¹. O MP_{10} está associado ao aumento relativo do risco de morte por doenças respiratórias em idosos⁴², além de produzir irritação nas vias respiratórias, inflamação pulmonar e até remodelamento brônquico em exposição crônica⁴³. Já concentrações de O_3 são maiores em Santo André desde 2012⁴¹. Concentrações elevadas de O_3 estão associadas ao aumento de internações por pneumonia, doença pulmonar obstrutiva crônica, asma, rinite alérgica e mortalidade prematura⁴⁴.

Modelo de regressão linear múltipla (RLM)

Conforme a metodologia, para a construção do modelo de RLM, diferentes combinações foram avaliadas a fim de encontrar a melhor delas para cada município. Para Santo André os maiores valores de r foram encontrados na taxa Sem Influenza (0,753 com todas variáveis explicativas e 0,628 com variáveis exclusivamente meteorológicas), enquanto para São Caetano do Sul os maiores valores foram para a taxa Top 3 (0,715 com todas variáveis e 0,689 só com variáveis meteorológicas). Ou seja, a correlação é maior na reconstrução da taxa com todas as variáveis explicativas, onde há dados de qualidade do ar, reforçando a relevância desse tipo de dados para

internações por doenças respiratórias¹³. Todos os valores encontrados são classificados como correlação forte uma vez que estão na faixa entre 0,61 e 0,90³².

As seguintes equações foram obtidas para os melhores modelos de RLM:

a) para Santo André, considerando todas as variáveis explicativas:

$$y = 680,08 - 2,15x_1 + 0,36x_2 - 0,70x_3 - 0,01x_4 + 1,33x_5 + 0,46x_6 + 0,19x_7 - 0,09x_8 + 0,19x_9$$

b) para Santo André, considerando somente as variáveis meteorológicas:

$$y = 386,72 - 1,75x_1 - 0,13x_2 - 0,33x_3 - 0,02x_4 + 1,63x_5$$

c) para São Caetano do Sul, considerando todas as variáveis explicativas:

$$y = -1927,38 - 0,19x_1 + 0,29x_2 - 2,09x_3 - 0,02x_4 + 1,19x_5 + 0,34x_6 - 0,07x_7 - 0,02x_8 - 0,14x_9$$

d) para São Caetano do Sul, considerando somente as variáveis meteorológicas:

$$y = -2213,87 - 0,66x_1 + 0,03x_2 + 2,44x_3 - 0,02x_4 + 1,29x_5$$

Onde, y = taxa de incidência; x_1 = temperatura do ar; x_2 = umidade relativa do ar; x_3 = pressão atmosférica do ar; x_4 = precipitação; x_5 = SPI; x_6 = concentração de MP_{10} ; x_7 = nº dias acima do limite para concentração de MP_{10} ; x_8 = concentração de O_3 ; x_9 = nº dias acima do limite para concentração de O_3 .

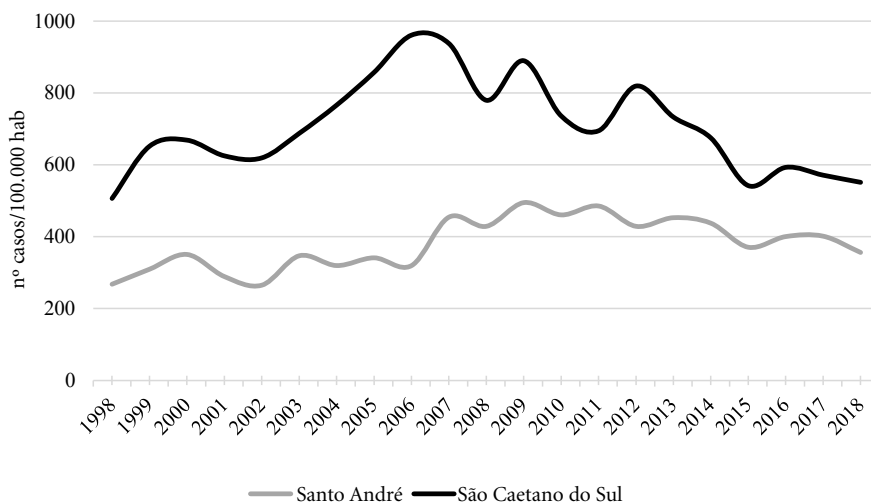


Figura 2. Taxas de incidência anual de internações por doenças respiratórias em Santo André e São Caetano do Sul no período de 1998 a 2018.

Para as equações de RL Mem Santo André, a temperatura possui o maior coeficiente (negativo - inversamente proporcional), seguido do SPI e concentração de MP_{10} (ambos positivos - diretamente proporcionais). Ou seja, pelo modelo de RLM construído, o aumento da temperatura tende a reduzir a taxa de incidência mensal. Para São Caetano do Sul os maiores pesos foram da pressão atmosférica, seguido do SPI e concentração de MP_{10} (todos diretamente proporcionais). Ou seja, com alta pressão atmosférica (condição de temperaturas menos altas e ausência de precipitação) as taxas de incidência tendem a aumentar⁴⁵. Nota-se que tanto o SPI (que indica épocas mais secas ou úmidas) quanto a concentração de MP_{10} tem forte influência nos modelos de RLM para ambos os municípios.

Sobre a métrica de erros na validação dos modelos estatísticos, o viés médio (VM) foi pequeno para todos os modelos de RLM (da ordem de 10^{-13}). Quanto ao erro amostral médio (EAM), os valores oscilaram entre 4,58 e 10,52 sendo sempre menor para Santo André em relação a São Caetano do Sul. Assim, no que diz respeito à avaliação dos erros, os modelos de RLM de Santo André apresentam maior precisão.

Simulações dos modelos climáticos e cenários futuros

Antes da aplicação do modelo de RLM para os cenários climáticos futuros foi avaliado o desempenho dos modelos climáticos em representar as condições presentes observadas no ciclo sazonal de cada variável. A Tabela 1 mostra os resultados de viés médio para os municípios nas simulações dos modelos climáticos utilizados. Precipitação e pressão atmosférica são as variáveis que apresentam maiores valores de erro médio para os municípios nos diferentes modelos climáticos. O Eta-HadGEM2-ES subestima a

temperatura e a umidade relativa e superestima a pressão atmosférica. O Eta-MIROC5 subestima temperatura e superestima a precipitação. Já o CMCC-CM subestima a temperatura e superestima as demais variáveis.

Tendo avaliado os erros sistemáticos dos modelos climáticos, procedeu-se a removê-los através da técnica Aplicação Direta. Essa técnica gera os fatores de correção utilizados para os dados das projeções futuras, diminuindo as incertezas associadas a esse tipo de erro.

Projeções futuras com base nos modelos climáticos

O fator de correção para cada mês e para cada modelo climático foi utilizado para corrigir as projeções futuras das variáveis explicativas dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e CMCC-CM para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, antes de aplicar ao melhor modelo de RLM de cada município (taxa Sem Influenza para Santo André e taxa Top 3 para São Caetano do Sul).

Para o município de Santo André, os três modelos climáticos apresentam uma taxa de incidência decrescente ao longo do período total (2019 a 2099) conforme a Figura 3. Em ambos os cenários RCP os menores valores de máximo e de mínimo da série foram registrados no último período analisado (2070 a 2099), entretanto o RCP 8.5 apresentou a maior redução da taxa de incidência, podendo diminuir até 26% em relação aos níveis atuais. Isso acontece porque o cenário RCP 8.5 projeta um maior aumento de temperatura em relação ao RCP 4.5, sendo essa variável de maior peso na equação de RLM de Santo André.

A análise por períodos, e comparando entre os três modelos, o Eta-HadGEM2-ES para o RCP 8.5 apresentou os maiores valores absolutos de anomalia conforme a Tabela 2, sendo maior para o período 2070-2099.

Tabela 1. Viés médio (VM) das variáveis explicativas simuladas pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para Santo André e São Caetano do Sul.

Município	Precipitação (mm)	Temperatura (°C)	Umid. Rel. (%)	Pressão (mb)
CMCC-CM				
Santo André	8,27	-0,71	8,53	16,50
São Caetano do Sul	7,27	-1,14	1,77	12,08
	Eta-Had	Eta-MIR	Eta-Had	Eta-MIR
Santo André	-9,53	14,34	-0,02	-3,21
São Caetano do Sul	3,10	13,34	-0,26	-3,64
	Eta-Had	Eta-MIR	Eta-Had	Eta-MIR
Santo André	-1,26	1,29	2,59	1,97
São Caetano do Sul	-8,49	-5,47	12,67	-2,45

Fonte: Autores, 2022.

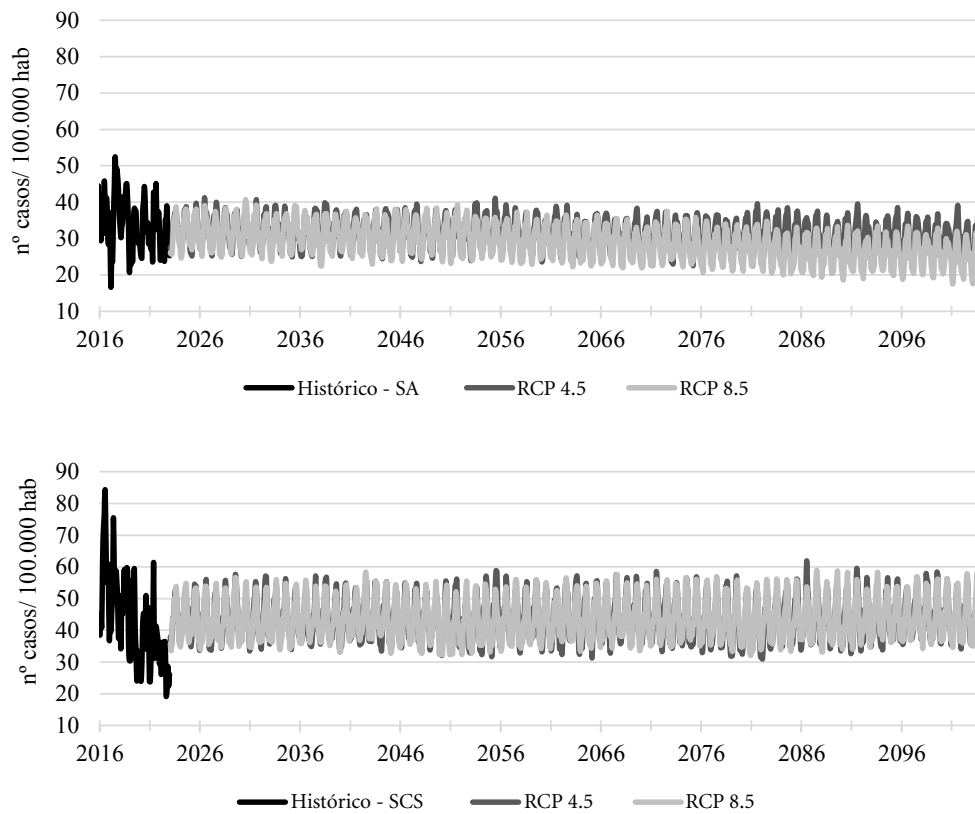


Figura 3. Taxas de incidência de internações por doenças respiratórias histórica e projeção média futura dos modelos climáticos para Santo André (acima) e São Caetano do Sul (abaixo).

Fonte: Autores, 2022.

Tabela 2. Anomalias para taxa de incidência mensais de internações por doenças respiratórias a tempo futuro.

Município	Período	Eta-HadGEM2-ES		Eta-MIROC5		CMCC-CM	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Santo André	2019-2039	-2,69	-3,78	-2,89	-3,52	-2,01	-2,27
	2040-2069	-3,90	-5,23	-3,37	-4,92	-3,45	-4,50
	2070-2099	-5,11	-9,21	-4,62	-7,62	-4,45	-7,75
São Caetano do Sul	2019-2039	1,83	0,27	2,38	3,04	0,02	0,03
	2040-2069	1,78	0,25	1,71	2,65	-0,31	-0,60
	2070-2099	2,00	0,92	2,26	4,22	-0,72	-0,79

Fonte: Autores, 2022.

Em São Caetano do Sul as taxas apresentam um pequeno crescimento no período de 2019 a 2099 nos modelos climáticos regionalizados. Tanto para o Eta-HadGEM2-ES quanto para o Eta-MIROC5 os maiores valores de anomalia foram encontrados no último período analisado (2070-2099), sendo que no Eta-HadGEM2-ES

esse aumento é maior no RCP 4.5, enquanto o inverso acontece para o Eta-MIROC5 (maior anomalia no RCP 8.5). Nesse último caso, o aumento da taxa pode chegar a quase 10% em relação aos níveis atuais, provavelmente porque o Eta-MIROC5 responde com menor aumento na temperatura (que é uma variável inversamente

proporcional na equação do modelo de RLM) em relação ao Eta-HadGEM2-ES¹⁸. Já o modelo climático global CMCC-CM indica pequena redução da taxa de incidência para os cenários RCP nos períodos de 2040-2069 e 2070-2099.

Contribuições da literatura

Ainda são poucos os estudos que analisam em conjunto variáveis atmosféricas, poluição e saúde. Um deles avaliou o impacto das mudanças climáticas na saúde através da temperatura, precipitação e número de internações para leishmaniose em municípios brasileiros em dois cenários do IPCC. Os resultados indicaram aumento de 15% de leishmaniose até o final do século em comparação com o cenário base 1992-2002⁴⁶. Outro estudo, com dados de Santo André, aplicou uma regressão linear de Poisson utilizando internações hospitalares, juntamente com temperatura, umidade e MP_{10} ⁴⁷. A pesquisa concluiu que junto ao aumento das emissões de MP_{10} , houve também um aumento no número de internações hospitalares por insuficiência cardíaca. Isso está alinhado ao que foi encontrado nos modelos de RLM no presente estudo, uma vez que a concentração de MP_{10} tem impacto relevante (terceiro maior peso). Outra variável de atenção é o SPI por ter o segundo maior peso nas equações. O tempo seco está associado com estabilidade atmosférica, o que dificulta a dispersão de poluentes na atmosfera, podendo levar a um aumento de até 10% nas internações por doenças respiratórias em relação ao período úmido e chuvoso⁴⁸. Outros estudos também indicam a umidade como variável importante nas relações de clima, poluição e saúde respiratória, principalmente nas crianças⁴⁹.

Estudos internacionais com projeções de clima futuro em diferentes cenários RCP indicam que a princípio a mortalidade relacionada à poluição deve aumentar na maioria dos casos, entretanto os resultados diferem por região, de forma que as mudanças climáticas podem tanto intensificar quanto reduzir os impactos na saúde respiratória⁵⁰. Essa mesma “variação” no impacto da mudança climática no clima foi identificada num estudo nacional focado no efeito da temperatura na mortalidade por doenças cardiovasculares⁵¹. Considerando que a saúde é determinada por múltiplos fatores, reconhece-se que os impactos à saúde respiratória podem ser influenciados por outros fatores além das variáveis utilizadas. Patz *et al.*⁵² ressaltam em um estudo de avaliação de impactos das mudanças climáticas

que as problemáticas de saúde são fruto de uma série de determinantes que não se limitam ao clima ou ao ambiente externo tais como a prática de exercícios, alimentação adequada ou ainda fatores genéticos.

Finalmente, mesmo que o Grande ABC Paulista tenha um Plano de Ação de Enfrentamento às Mudanças Climáticas, a questão da saúde não é tratada de forma específica¹⁶. A região apresenta diversidade e desigualdade espacial, social, econômica e ambiental. Nas comunidades e assentamentos precários, onde faltam infraestrutura básica e acesso a recursos, o impacto das mudanças climáticas pode ser sentido de forma mais intensa. Portanto, são necessárias políticas públicas que considerem a relação de clima e saúde, especialmente voltadas para adaptação dos grupos mais vulneráveis.

Considerações finais

Apesar de vizinhos, os municípios estudados apresentam características diferenciadas das variáveis analisadas. Embora as taxas anuais de incidência de internações por doenças respiratórias tenham reduzido nos últimos 10 anos, São Caetano do Sul apresenta taxa de incidência maior. Os modelos de RLM (tanto com variáveis exclusivamente meteorológicas quanto com dados de qualidade do ar) são classificados como fortes, ainda que num período de dados relativamente pequeno. A correlação entre as taxas observada e reconstruída é maior em Santo André. As variáveis de maior impacto nos modelos de RLM são a temperatura para Santo André e a pressão atmosférica para São Caetano do Sul. Tanto o SPI quanto a concentração de MP_{10} têm peso relevante para o modelo de RLM em ambos os municípios.

As projeções climáticas, segundo os modelos climáticos e cenários de emissões analisados, tendem a reduzir a taxa de incidência para Santo André. Ou seja, as mudanças climáticas, num contexto de aquecimento, levariam a de crescimento de até 26% nas taxas de incidência nesse município. O mesmo não acontece para São Caetano do Sul, que indica uma tendência de aumento da taxa em até 10% (nos modelos climáticos regionalizados). Ou seja, as mudanças climáticas poderiam aumentar as internações na saúde respiratória em São Caetano do Sul. De forma geral, os modelos climáticos regionalizados apresentaram menor erro sistemático em relação ao modelo global.

Os resultados desse trabalho podem ser relevantes para promover informações que estimulem políticas públicas de saúde específicas para cada um dos municípios estudados. Recomenda-se em trabalhos futuros a inserção da variável meteorológica velocidade dos ventos, associada à dispersão de poluentes, além de considerar uma série mais longa de dados observa dose de igual intervalo, o que poderia deixar mais robusto o modelo de RLM. Modelos climáticos que incluam poluentes em suas projeções podem retratar melhor as condições futuras das taxas de incidên-

cia. Também, outros tipos de modelos de regressão, como a de Poisson ou polinomial podem ser testados. Sobre as taxas de incidência, é possível fazer a divisão em faixas etárias, que permitirá identificar grupos mais vulneráveis, além de analisá-las de forma sazonal, uma vez que no inverno as internações são maiores. Tais recomendações podem endereçar e complementar as limitações do trabalho atual e quiçá encontrar correlações ainda mais fortes entre as mudanças climáticas e saúde respiratória para os habitantes de Santo André e São Caetano do Sul.

Colaboradores

Vassari-Pereira D trabalhou na concepção e definição do objetivo e escopo, na coleta e processamento de dados, elaboração de pesquisa teórica e condensação de conhecimentos a respeito do tema, bem como na redação das versões parciais e final do artigo. MC Valverde colaborou na elaboração da metodologia, gerenciamento dos prazos, validação dos resultados, (principalmente voltados à climatologia) e na supervisão geral. GF Asmus teve papel similar, porém de forma secundária e com foco nos dados de saúde.

Referências

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC; 2014.
- Artaxo P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno? *Rev USP* 2004; 103:13-24.
- Nobre CA, Oliveira GS, Salazar LF. Cenários de mudanças climáticas para a América do Sul para o final do século 21. *Parc Estrat* 2008; 13:27.
- Watts N, Amann M, Arnell N, Ayeb-K S, Belesova K, Boykoff M, Byass P, Cai W, Campbell-L D, Capstick S, Chambers J, Dalin C, Daly M, Dasandi N, Davies M, Drummond P, Dubrow R, Ebi KL, Eckelman M, Ekins P, Escobar LE, Montoya LF, Georgeson L, Graham H, Haggag P, Hamilton I, Hartinger S, Hess J, Kelman I, Kiesewetter G, Kjellstrom T, Kniveton D, Lemke B, Liu Y, Lott M, Lowe R, Sewe MO, Martinez-U J, Maslin M, McAllister L, McGushin A, Mikhaylov SJ, Milner J, Moradi-L M, Morrissey K, Murray K, Munzert S, Nilsson M, Neville T, Oreszczyn T, Owfi F, Pearman O, Pencheon D, Phung D, Pye S, Quinn R, Rabhaniha M, Robinson E, Rocklöv J, Semenza JC, Sherman J, Shumake-G J, Tabatabaei M, Taylor J, Trinanes J, Wilkinson P, Costello A, Gong P, Montgomery H. The 2019 report of The Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate. *Lancet* 2019; 394(10211):1836-1878.
- Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, Olwoch JM, Revich B, Sauerborn R. 2014: Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press; 2014. p. 709-754.
- Hacon SS, Costa S, Siqueira ASP, Pinheiro SL, Gonçalves KS, Oliveira A, Barcellos C. Capítulo 8. Vulnerabilidade, riscos e impactos das mudanças climáticas sobre a saúde no Brasil. In: Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). *Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil*. Brasília: MCTI; 2016. p. 387-460.
- D'amato G, Bergmann KC, Cecchi L, Annesi-Maesano I, Sanduzzi A, Liccardi G, Vitale C, Stanziola A, D'amato M. Climate Change and air pollution: Effects on pollen allergy and other allergic respiratory diseases. *Allergo J Int* 2014; 23(1):17-23.
- Confalonieri UEC, Marinho DP. Mudança climática Global e Saúde: Perspectivas para o Brasil. *Multiciência* 2007; 8:48-64.
- Brasil. Ministério da Saúde (MS). Secretaria de Vigilância em Saúde. Organização Pan-Americana da Saúde: Série Saúde Ambiental 3. *Mudanças Climáticas e Saúde: um perfil do Brasil*. Brasília: MS; 2009.
- Vormittag EMPAA, Rodrigues CG, Miranda MJ, Cavalcante JA, Costa RR, Camargo CA, Saldiva PHN. *Avaliação do impacto da poluição atmosférica no estado de São Paulo sob a visão da saúde*. São Paulo: Instituto Saúde e Sustentabilidade; 2013.
- Moraes ACL, Ignotti E, Artaxo Netto P, Jacobson LSV, Castro H, Hacon SS. Wheezing in children and adolescents living next to a petrochemical plant in Rio Grande do Norte, Brazil. *J Pediatr* 2010; 86(4):337-344.
- Zaccarelli-Marino MA. Chronic autoimmune thyroiditis in industrial areas in Brazil: A 15-Year Survey. *J Clin Immunol* 2012; 32(5):1012-1018.
- Moraes SL, Almendra R, Santana P, Galvani E. Variáveis meteorológicas e poluição do ar e sua associação com internações respiratórias em crianças: estudo de caso em São Paulo, Brasil. *Cad Saude Publica* 2019; 35(7):e00101418.
- Coelho MSZS, Gonçalves FLT, Latorre MRDO. Statistical Analysis Aiming at Predicting Respiratory Tract Disease Hospital Admissions from Environmental Variables in the City of Sao Paulo. *J Environ Public Health* 2010; 2010:209270.
- Centro de Informações das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio). *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Rio de Janeiro: UNIC Rio; 2016.
- Consórcio Intermunicipal do Grande ABC. Grupo de Trabalho Meio Ambiente e Grupo Temático Mudanças Climáticas. *Plano de Ação de Enfrentamento às Mudanças Climáticas do Grande ABC*. Santo André: Consórcio Intermunicipal do Grande ABC; 2017.
- Valverde MC, Cardoso AO, Brambila R. O padrão de chuvas na região do ABC Paulista: os extremos e seus impactos. *Rev Bras Climatol* 2018; 14(22):165-187.
- Chou SC, Silva A, Lyra A, Mourão C, Dereczynski C, Rodrigues D, Campo D, Chagas D, Siqueira G, Sueiro G, Pilotto I, Gomes J, Bustamante J, Tavares P. Capítulo 2. Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul. In: Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). *Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil*. Brasília: MCTI; 2016. p. 49-92.
- Scoccimarro E, Gualdi S, Bellucci A, Sanna A, Fogli PG, Manzini E, Vichi M, Oddo P, Navarra A. Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High Resolution Coupled General Circulation Model. *J Clim* 2011; 24:4368-4384.
- Taylor KE, Stouffer R, Meehl GA. An overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull Am Meteorol Soc* 2011; 93(4):485-498.
- World Climate Research Programme (WCRP). *CMIP5 Project Data* [Internet]. 2019 [cited 2020 mar 18]. Available from: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>.
- Chou SC, Lyra A, Mourão C, Dereczynski C, Pilotto I, Gomes J, Bustamante J, Tavares P, Silva A, Rodrigues D, Campos D, Chagas D, Sueiro G, Siqueira G, Nobre P, Marengo J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *Am J Clim Change* 2014; 3:438-454.
- Chou SC, Lyra A, Mourão C, Dereczynski C, Pilotto I, Gomes J, Bustamante J, Tavares P, Silva A, Rodrigues D, Campos D, Chagas D, Sueiro G, Siqueira G, Nobre P, Marengo J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *Am J Clim Change* 2014; 3:512-527.

24. Lyra A, Tavares P, Chou SC, Sueiro G, Dereczynski CP, Sondermann M, Silva A, Marengo J, Giarolla A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theor Appl Climatol* 2018; 132:663-682.
25. Chiquetto JB. *Padrões atmosféricos associados a concentrações de ozônio troposférico na região metropolitana de São Paulo* [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2008.
26. Brasil. Ministério da Saúde (MS). Departamento de Informática do SUS (DATASUS). *Classificação Estatística Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde - CID-10* [Internet]. 2018 [acessado 2020 mar 18]. Disponível em: <http://www.datasus.gov.br/cid10/V2008/cid10.html/>.
27. Nicolopoulou-Stamati P, Hens L, Howard CV. *Environmental Health Impacts of Transport and Mobility*. Netherlands: Springer; 2005.
28. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Eighth Conference on Applied Climatology*. Anaheim: American Meteorological Society; 1993.
29. Blain GC. *Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do estado de São Paulo* [dissertação]. Campinas: Universidade Estadual Paulista; 2005.
30. Tadano YS, Ugaia CML, Franco AT. Método de Regressão de Poisson: metodologia para avaliação do impacto da poluição atmosférica na saúde populacional. *Ambient Soc* 2009; 12(2):241-255.
31. Naghettini M, Pinto EJA. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM; 2007.
32. Santos D, Toledo Filho MR. Estudo sobre a influência de variáveis meteorológicas em internações hospitalares em Maceió-AL, durante o período 1998 a 2006. *Rev Bras Meteorol* 2014; 29(3):457-467.
33. Subramanian A, Coutinho AS, Silva LB. Aplicação de método e técnica multivariados para previsão de variáveis termoambientais e perceptivas. *Produção* 2007; 17(1):52-70.
34. Piana CFB, Machado AA, Selau LPR. *Estatística Básica*. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas; 2009.
35. Oliveira GG, Pedrollo OC, Castro NMR. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTec/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. *Rev Bras Meteorol* 2015; 30(1):101-121.
36. Silva MCO, Valverde MC. Cenário futuro da disponibilidade hídrica na bacia do Alto Tietê. *Rev Bras Cienc Ambient* 2017; 43:114-130.
37. Sousa RM. *Mudanças climáticas futuras simuladas pelos modelos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o estado do Tocantins* [dissertação]. Gurupi: Universidade Federal do Tocantins; 2017.
38. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Brasil em Síntese/IBGE Cidades* [Internet]. [acessado 2018 mar 18]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>.
39. Valverde MC, Paiva Junior H. Temperatura do ar e emissões urbanas em região industrial de São Paulo, Brasil. *Acta Brasiliensis* 2018; 2(2):45-52.
40. Gouveia N, Corallo FP, Leon ACP, Junger W, Freitas CU. Poluição do ar e hospitalizações na maior metrópole brasileira. *Rev Saude Publica* 2017; 51:117.
41. Vassari-Pereira D. *Impacto das mudanças climáticas na saúde respiratória dos habitantes do grande ABC Paulista: elaboração de modelos em diferentes cenários climáticos* [monografia]. Santo André: Universidade Federal do ABC; 2019.
42. Andrade MF, Kumar P, Freitas ED, Ynoue RY, Martins J, Martins LD, Nogueira T, Perez-Martinez P, Miranda RM, Albuquerque T, Gonçalves FLT, Oyama B, Zhang Y. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmos Environ* 2017; 159:66-82.
43. Arbex MA, Santos UP, Martins LC, Saldiva PHN, Pereira LAA, Braga ALF. A poluição do ar e o sistema respiratório. *J Bras Pneumol* 2012; 38(5):634-655.
44. Ebi K, McGregor G. Mudanças climáticas, ozônio troposférico e partículas suspensas: impactos na saúde. *Cien Saude Colet* 2009; 14(6):2281-2293.
45. Ahrens CD. *Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere*. Stamford: Cengage Learning; 2014.
46. Mendes CS, Coelho AB, Féres JG, Souza EC, Cunha DA. Impacto das mudanças climáticas sobre a leishmaniose no Brasil. *Cien Saude Colet* 2016; 21(1):263-272.
47. Negrete BR, Rosa CC, Ikeuti DH, Delena PJ, Borba TM, Braga ALF. Poluição atmosférica e internações por insuficiência cardíaca congestiva em adultos e idosos em Santo André (SP). *Arq Bras Cien Saude* 2010; 35(3):208-212.
48. Rosa AM, Ignotti E, Hacon SS, Castro HA. Análise das internações por doenças respiratórias em Tangará da Serra - Amazônia Brasileira. *J Bras Pneumol* 2008; 34(8):575-582.
49. Passos SD, Gazeta RE, Felgueiras AP, Beneli PC, Coelho MSZS. A poluição e o clima podem influenciar as infecções respiratórias em crianças? *Rev Assoc Med Bras* 2014; 60(3):276-283.
50. Orru H, Ebi KL, Forsberg B. The Interplay of Climate Change and Air Pollution on Health. *Rev Curr Envir Health Rpt* 2017; 4:504-513.
51. Silveira IH. *Efeitos da temperatura na mortalidade por doenças cardiovasculares e impactos futuros segundo cenários de mudanças climáticas no Brasil* [tese]. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro; 2019.
52. Patz J, Campbell-Lendrum D, Gibbs H, Woodruff R. Health Impact Assessment of Global Climate Change: Expanding on Comparative Risk Assessment Approaches for Policy Making. *Annu Rev Public Health* 2008; 29:27-39.

Artigo apresentado em 31/01/2020

Aprovado em 29/07/2021

Versão final apresentada em 01/08/2021

Editores-chefes: Romeu Gomes, Antônio Augusto Moura da Silva