

ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO₂) NO BRASIL (2017-2021): IMPACTO DAS MEDIDAS DE RESTRIÇÃO DA PANDEMIA DE COVID-19 NA REDUÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Eduarda Gomes de Souza

Graduanda de Engenharia Ambiental e Sanitária (EAS) – UFPEL

E-mail: gseduarda@gmail.com

Alessandra Magnus Lazuta

Graduanda de Engenharia Ambiental e Sanitária (EAS) – UFPEL

E-mail: alessandra.lazuta@gmail.com

Tifany de Souza

Graduanda de Engenharia Ambiental e Sanitária (EAS) – UFPEL

E-mail: aleonamsouza@gmail.com

Lismara Carvalho Marques

Graduanda de Engenharia Ambiental e Sanitária (EAS) – UFPEL

E-mail: lismaracmarques@gmail.com

Diuliana Leandro

Doutora em Ciências Geodésicas – UFPR

Professora do Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAMB) – UFPEL

E-mail: diuliana.leandro@gmail.com

Willian Cézar Nadaleti

Doutor e Pós Doutor em Engenharia Ambiental – UFSC

Professor do Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAMB) – UFPEL

E-mail: williancezarnadaleti@gmail.com

59

RESUMO

As medidas de bloqueio e restrição devido à pandemia de COVID-19 tiveram impacto significativo na redução de dióxido de nitrogênio e o monitoramento do comportamento do elemento na atmosfera é uma temática relevante de análise espacial e temporal. Portanto, o estudo tem como objetivo analisar o impacto da pandemia de COVID-19 na variação da concentração de dióxido de nitrogênio ao longo dos últimos cinco anos no Brasil. Assim, primeiro foram coletados os dados referentes ao dióxido de nitrogênio troposférico a partir do sistema GIOVANNI desenvolvido pela Agência Espacial Americana (NASA), através do sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument). Além disso, o período de análise foi delimitado às médias diárias de 15 de abril a 31 de maio, durante os anos de 2017 a 2021 no território nacional. Posteriormente, o software QGIS permitiu a elaboração de mapas para analisar espacialmente a variação da concentração de NO₂. Observou-se que durante o período de bloqueios houve redução na poluição atmosférica em relação às emissões de dióxido de nitrogênio troposférico em todas as cidades monitoradas no ano de 2020, em relação aos anos anteriores. Ainda, os índices de variação da concentração de NO₂ mais significativos, em torno de $2 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$, foram constatados nas cidades onde se localizam os maiores centros urbanos do país, no estado de São Paulo e do Rio de Janeiro. Contudo, com a flexibilização das medidas de restrição no ano de 2021 os valores voltaram a aumentar equivalentemente aos anos anteriores.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento remoto; planejamento urbano; emissões; gases de efeito estufa; SARS - CoV2.

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF NITROGEN DIOXIDE (NO_2) CONCENTRATION IN BRAZIL (2017-2021): IMPACT OF THE COVID-19 PANDEMIC RESTRICTION MEASURES ON REDUCING AIR POLLUTION

ABSTRACT

The lockdowns and restrictions measures due to the COVID-19 pandemic had a significant impact in reducing nitrogen dioxide (NO_2) concentrations, and monitoring the behavior of this element in the atmosphere is an essential spatial and temporal analysis theme. The present study seeks to analyze the impact of the COVID-19 pandemic on the variation of nitrogen dioxide concentration over the last five years in Brazil. Thus, the GIOVANNI system developed by the American Space Agency (NASA) through the Ozone Monitoring Instrument (OMI) sensor allowed to collect the data on tropospheric nitrogen dioxide. Moreover, the period of analysis was delimited to daily averages from 15 April to 31 May, during the years 2017 to 2021 in the national territory. Subsequently, the QGIS software enabled the elaboration of maps to spatially analyze the NO_2 concentration variation. A reduction during the period of blockages in air pollution concerning tropospheric nitrogen dioxide emissions in cities monitored in 2020 was observed, compared to previous years. Besides, the states of São Paulo and Rio de Janeiro reached the most significant NO_2 concentration variation rates, around $2 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$. Nevertheless, with the flexibilization of the restriction measures in 2021, the values increased again equivalently to the previous years.

KEYWORDS: Remote sensing; urban planning; emissions; greenhouse gases; SARS - CoV2.

INTRODUÇÃO

COVID – 19 é a denominação para a doença (SARS - CoV2), surgido na China no final do ano de 2019, o qual foi declarado pandemia pela Organização Mundial de Saúde (OMS) em março de 2020 (WHO, 2020; PAÚL, 2020). A doença que se espalhou rapidamente em várias regiões do mundo, acarretou diferentes impactos para o meio ambiente, economia e saúde humana (FREITAS *et al.*, 2020).

No início do ano de 2020, principalmente nos meses de abril a maio, o isolamento social e medidas restritivas foram adotados com o intuito de minimizar a curva de contaminação do vírus (GONZAGA e FREITAS, 2020). Estas medidas de bloqueio resultaram na redução do fluxo de automóveis, das atividades industriais e demais atividades econômicas primárias ou secundárias, e consequentemente na diminuição da poluição atmosférica em vários países, inclusive no Brasil (SICILIANO *et al.*, 2020; BENCHRIF *et al.*, 2021).

Diversos estudos avaliaram o impacto da pandemia de COVID-19 e das medidas de bloqueio ou *lockdown*, na concentração de alguns poluentes em diferentes países como na China, Canadá, Índia, Brasil, Itália, EUA, Marrocos, entre outros (BAO e ZHANG 2020; ADAMS 2020; BERMAN e EBISU 2020; GAUTAM 2020; NAKADA e URBAN 2020; WU *et al.*, 2020; OTMANI *et al.*, 2020). Dentro desta perspectiva, a avaliação das mudanças nos ambientes naturais

e urbanos por meio de satélites é considerada uma alternativa econômica e eficiente para coleta de dados visando monitorar e modelar esses fenômenos atmosféricos (CARVALHO, NETO e LIMA 2011). Logo, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o sensoriamento remoto são ferramentas com grande potencial para auxiliar no tratamento e análise de dados, assim como para o monitoramento do comportamento de determinados gases na atmosfera como o dióxido de nitrogênio (NO_2) e as mudanças nas paisagens (PINHEIRO; DURIGAN, 2009).

No âmbito mundial, em trabalho realizado na Itália por Coccia *et al.* (2020), a quarentena demonstrou ter implicações na redução do índice de poluição do ar no Vale do Pó, reduzindo a quantidade de NO_2 , material particulado, entre outros poluentes (COCCIA *et al.*, 2020). No contexto nacional, no estado de São Paulo, em estudo desenvolvido por Nakada e Urban (2020), os autores relatam uma diminuição de 54,3% nas concentrações de NO_2 em ($\mu\text{g.m}^{-3}$), nas áreas urbanas no período de bloqueios parciais. Em nível municipal, na capital do estado a queda abrupta no setor de transportes impactou diretamente nas concentrações de NO_2 , segundo as medições realizadas nas estações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que indicaram uma diminuição considerada alta nos poluentes atmosféricos neste período (CETESB, 2020; GONZAGA e FREITAS, 2020).

As principais fontes de emissão do NO_2 são atividades como a queima de combustíveis fósseis, indústrias de fertilizantes, fornos e caldeiras industriais e a agricultura (CAMPOS *et al.*, 2006). Nessa perspectiva, o setor de transportes tem se mostrado um dos maiores desafios para o desenvolvimento sustentável (MATHIESEN *et al.*, 2015). No ano de 2020, 47% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil foram resultado deste segmento, baseado majoritariamente em combustíveis fósseis (SEEG, 2021). Embora as tendências nos setores de aquecimento e eletricidade de alguns países representem um progresso na diminuição da demanda e na introdução de fontes de energia limpa e renovável, caracterizada como transição energética, o transporte ainda segue as tendências antiquadas de utilização de quantidades crescentes de combustíveis fósseis (GRAYSON, 2017; DOMINKOVIĆ *et al.*, 2018).

Ademais, do ponto de vista toxicológico, o NO_2 é o mais tóxico dentre os óxidos de nitrogênio, podendo ser fator determinante para o agravamento de doenças respiratórias ou transmitidas pela via respiratória como a COVID-19 (UGUCIONE *et al.*, 2002; OGEN, 2020). Por isso, o monitoramento de compostos como este torna-se fundamental para o planejamento urbano, e imprescindível no contexto pandêmico, auxiliando na tomada de decisão relacionada a medidas preventivas visando a diminuição de riscos à saúde e ao meio ambiente (BUCCO, 2010).

Nesse sentido, Ogen (2020) examinou a relação entre a exposição à longo prazo de NO_2 e a taxa de mortalidade relacionada ao coronavírus, através de uma análise espacial na Itália, Espanha, França e Alemanha. De acordo com os resultados, de 4443 casos fatais, 3487 (78%) estavam localizados nas cinco regiões do norte da Itália e na região central da Espanha, sendo que as mesmas cinco regiões demonstraram as maiores concentrações de NO_2 , ou seja, a exposição em longo prazo a este poluente pode ser um dos fatores contribuintes para fatalidade causada pelo COVID-19 nestas regiões e no mundo (OGEN, 2020).

A utilização de ferramentas atreladas ao SIG e sensoriamento remoto em estudos de poluição atmosférica permite avaliar as mudanças ocorridas nas áreas com um bom custo-benefício, visto a possibilidade de obter uma alta qualidade nos produtos gerados nestes sistemas (MARTINS *et al.*, 2014). Outra vantagem do uso do sensoriamento remoto para analisar a variabilidade espacial e temporal do NO_2 , é que o elemento tem um curto tempo de residência na camada limite do planeta, em torno de um dia (KROTKOV *et al.*, 2015). Para este estudo foi utilizado o sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument), acoplado ao satélite AURA. Em concordância com Ugucione *et al.*, (2002), o NO_2 está diretamente correlacionado ao ozônio (O_3), do mesmo modo que, na presente análise a coluna de dióxido de nitrogênio analisada encontrava-se acoplada à coluna de ozônio no sistema.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise espacial e temporal das concentrações médias de dióxido de nitrogênio troposférico no Brasil durante os anos de 2017 a 2021, com foco no período de bloqueios mais intensos ocasionados pela pandemia de COVID-19 nos meses de abril a maio. Sendo assim, apesar dos anos escolhidos para realizar a análise constituírem uma série temporal curta, durante esse período existiram mudanças relevantes no comportamento da humanidade de uma maneira geral, em função da pandemia, visto que as atividades da economia cessaram significativamente. Influenciando nas questões de movimentação, por exemplo, que geram emissões desses gases. Ademais, o intervalo de tempo pequeno da série teve o objetivo de analisar duas situações distintas: uma situação onde há normalidade, com produção industrial grande, deslocamento da população contínuo e isso se reflete nos anos de 2017, 2018 e 2019, assim como durante e após o momento pandêmico no ano de 2020 e 2021 respectivamente, onde esses hábitos acabaram sendo alterados, os quais, em determinados momentos, resultaram nessa diminuição abrupta das atividades industriais, com deslocamento populacional descontínuo, entre outros. Posto isso, deve-se considerar que, durante esse período, houve alterações muito expressivas, entretanto, se isso fosse analisado por uma série maior, não

haveria variações tão grandes entre anos distintos.

Em busca de uma melhor compreensão do tema estudado, a análise realizada teve como foco de investigação apenas o NO_2 , que ainda é um tema pouco explorado na comunidade científica nacional. Outra questão importante a considerar é o fato do gás se correlacionar diretamente com essas atividades, sobretudo com o tráfego veicular, e constituir-se em um poluente emitido principalmente a partir de ações antrópicas, indicando desse modo, a intensidade das atividades humanas nos grandes centros urbanos, como também se concentrar próximo às fontes de emissão (ZHANG *et al.*, 2019; KROTKOV *et al.*, 2015). Além de diversos estudos indicarem a possibilidade do NO_2 ter efeitos nocivos à saúde humana, o mesmo pode atuar como precursor para a formação de outros poluentes atmosféricos em ambiente urbano, como o material particulado fino ($\text{PM}_{2,5}$) e o ozônio (HUANG *et al.*, 2021; COLLIVIGANARELLI *et al.*, 2021).

Outrossim, o trabalho visa preencher a lacuna encontrada na literatura relacionada à falta de análise espacial e temporal das concentrações de NO_2 em outras regiões brasileiras com grandes centros urbanos além do Sudeste, como no Sul do país, em estados que apresentam variações significantes como no Rio Grande do Sul e Paraná, por exemplo. Desse modo, o estudo é pioneiro em analisar e as variações no índice de NO_2 em municípios de grande porte do Sul, como Porto Alegre, Canoas e São José dos Pinhais no período pré, durante e pós quarentena. Por fim, espera-se que a pesquisa proposta auxilie na elaboração de políticas públicas ambientais e tomada de decisão referente ao planejamento urbano das cidades, tanto para avaliação do impacto dos bloqueios na mitigação da poluição atmosférica, mas também sua efetividade como medida alternativa relativamente simples para melhorar o índice de qualidade do ar no momento pós pandemia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de poluição atmosférica, especificamente da coluna de NO_2 troposférico analisados no trabalho foram obtidos através do satélite AURA a partir do sistema GIOVANNI através do Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES-DISC), abreviação para GES-DISC Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure, desenvolvido pela Agência Espacial Americana (NASA) (ACKER; LEPTOUKH, 2007).

Desse modo, o estudo consistiu em duas etapas: primeiro foram obtidos os dados referentes ao dióxido de nitrogênio troposférico. O monitoramento através do sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument) permitiu a avaliação do comportamento deste gás na atmosfera. Posteriormente, o período de análise foi delimitado às médias diárias de 15 de abril a 31 de maio, durante os anos de

2017, 2018, 2019, 2020 e 2021 para o Brasil.

Na segunda etapa do trabalho, a elaboração de mapas foi utilizada para analisar espacialmente a variação da concentração de NO_2 , a qual foi realizada no *software* QGIS versão 3.16 Hannover. Este se caracteriza como um *software* livre com código fonte aberto, ou uma multiplataforma do Sistema de Informação Geográfica que permite a visualização, manipulação e análise de dados georreferenciados, agregado ao Sistema de Referência DATUM SIRGAS, 2000. Na Figura 1 pode-se observar a localização da área de estudo:

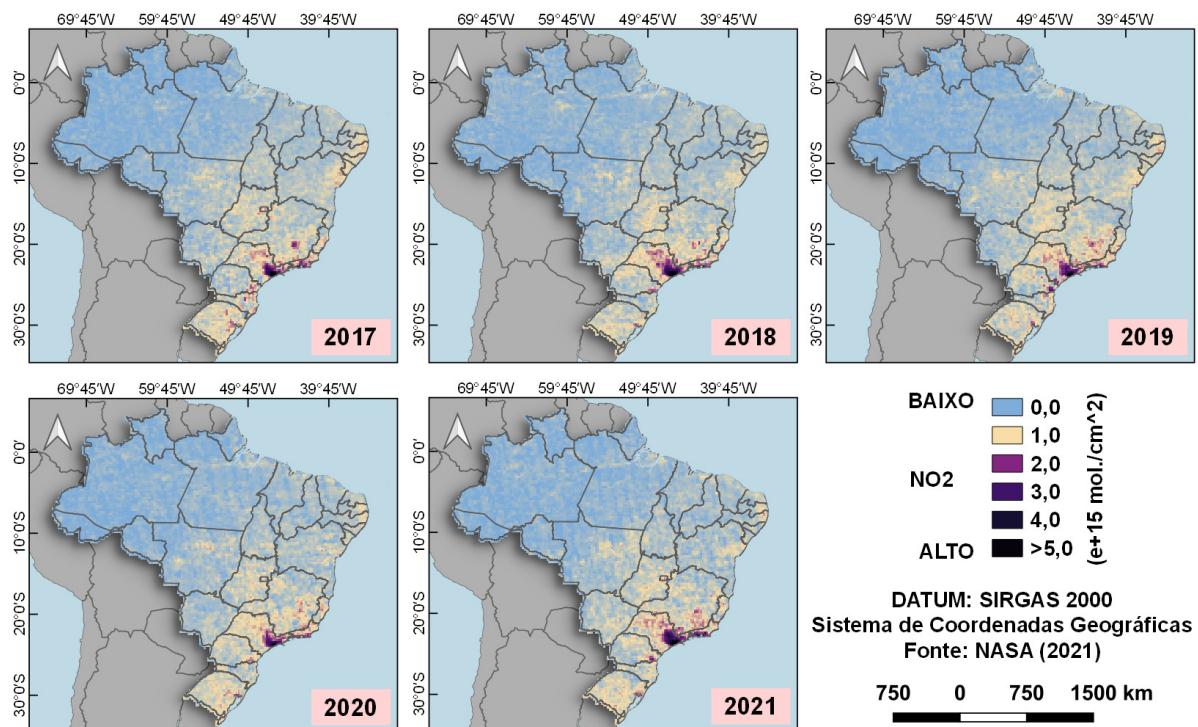
Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 temos a variação espacial e temporal da concentração média de NO_2 de 2017 a 2021, com foco no período mais intenso das medidas de restrição da pandemia, nos meses de abril a maio. Pode-se notar na figura, em cores mais escuras, as regiões com as maiores concentrações de NO_2 , que variam de 0 e^{+15} a $5 \text{ e}^{+15} \text{ (1/cm}^2\text{)}$.

Figura 2 - Variação da concentração média anual de dióxido de nitrogênio no Brasil.



Elaboração: Autores.

65

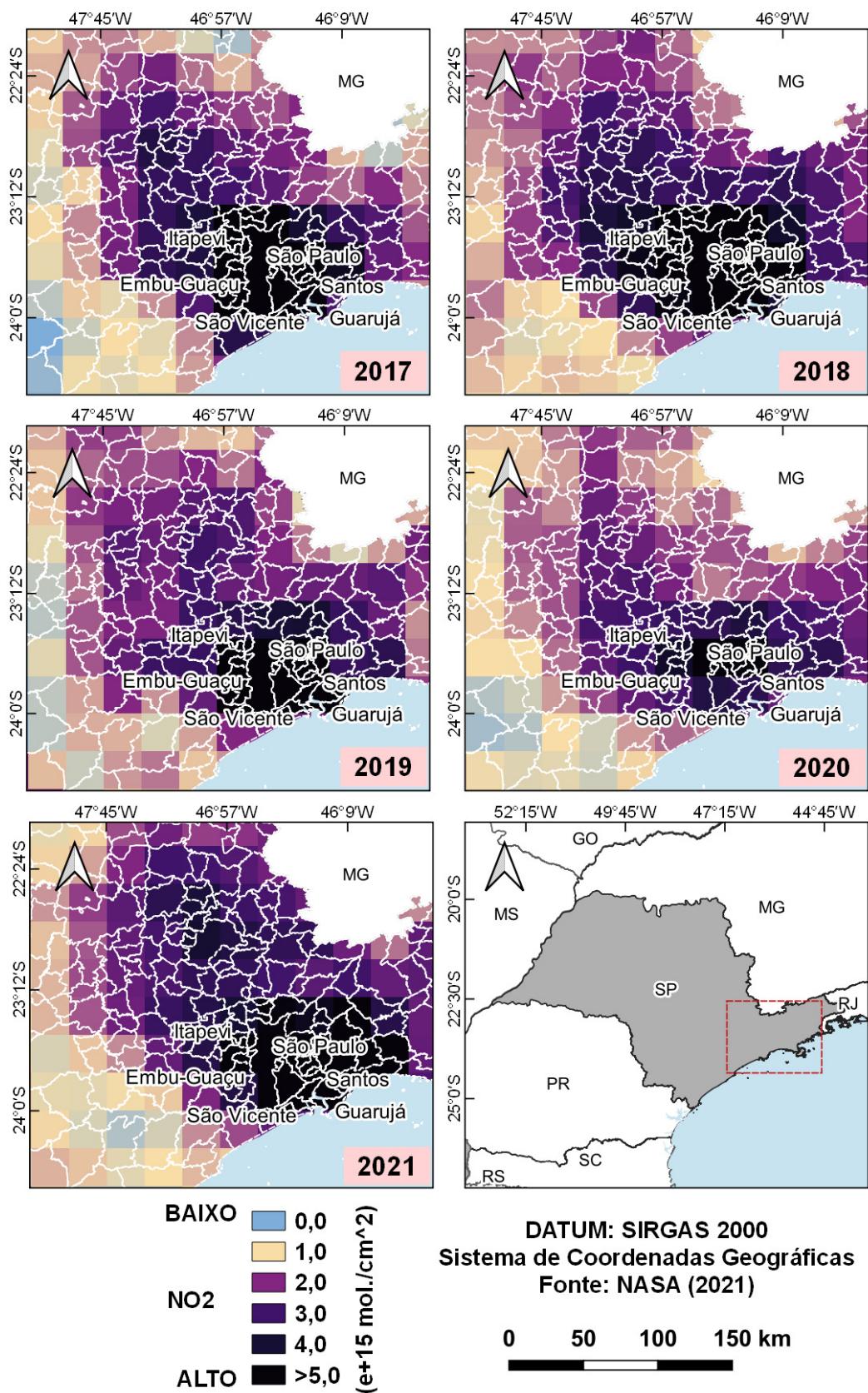
Na Figura 2 pode-se observar que, durante todo o período analisado, os estados de São Paulo (SP) e Rio de Janeiro (RJ) obtiveram altos índices de concentração de NO_2 troposférico. Isso se deve ao fato de ambos estados terem grandes centros urbanos, com altos níveis de industrialização, grande número de habitantes e tráfego intenso de veículos, que se configuraram nas maiores fontes emissoras de NO_2 (SICILIANO *et al.*, 2020b). Contudo, é notável que, no ano de 2020, os dois estados indicassem reduções significativas na concentração do elemento.

No contexto mundial, na Índia, em estudo realizado por Siddiqui *et al.* (2020), os autores observaram uma redução média de 46% nos valores médios de NO_2 e uma melhora de 27% no Índice de Qualidade do Ar (IQA) nos oito maiores centros urbanos do país, durante a primeira fase de bloqueios, e ainda apontam que 53% dos casos de coronavírus e 61% dos casos de mortalidade por conta da doença foram observados apenas nestas cidades. Enquanto no centro-oeste brasileiro, especificamente em Mato Grosso do Sul, as variações médias na concentração de NO_2 dos anos de 2005-2019 e 2005-2020 demonstraram que as cidades de Campo Grande, Corumbá, Dourados, e Três Lagoas apresentaram uma redução média de 14,9% no ano de 2020 em relação aos anos de 2005-2019 (DE SOUZA *et al.*, 2021).

Em âmbito nacional, os estados de São Paulo e Rio de Janeiro foram os primeiros a aderir de forma mais intensa às medidas de restrição da pandemia devido ao aumento no número de casos de COVID-19 (MANTOVANI *et al.*, 2020). Nestas regiões, é importante ressaltar que no caso para as indústrias, não houve determinações de bloqueio, todavia, o transporte público foi limitado e os veículos particulares tinham que passar por um sistema, no qual estes seriam liberados para viajar desde que suas placas correspondessem a certos dígitos e dias da semana que foram definidos pelo estado (SICILIANO *et al.*, 2020b).

Na Figura 3 encontram-se expostos os municípios de São Paulo com os maiores níveis de concentração do poluente no período de 2017 a 2021:

Figura 3 - Concentração média de dióxido de nitrogênio no estado de São Paulo.

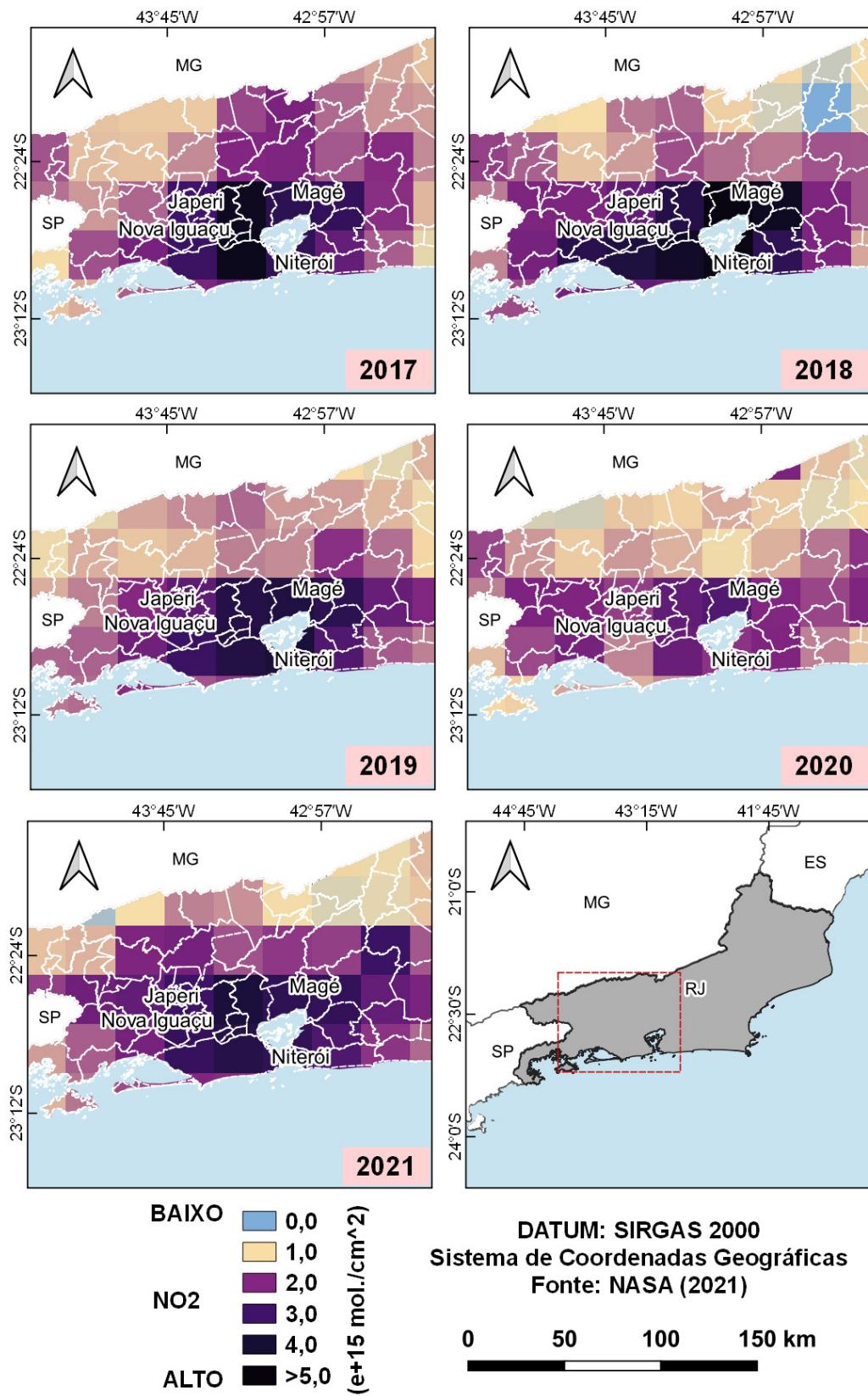


Elaboração: Autores.

A Figura 3 mostra, por exemplo, o município de Embu-Guaçu no ano de 2019 com uma concentração média $>5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$, enquanto no ano de 2020 o índice do mesmo município encontrava-se em torno de $3 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$. Já no ano seguinte, a cidade apresenta valores maiores novamente, equivalente a $5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$. Esse resultado se assemelha ao encontrado por Benchrif *et al.*, (2021), que observou valores nos níveis de $\text{NO}_2 > 5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ nas cidades de Beijing e Chengdu localizadas na China, sendo que na primeira notou-se uma diferença de $2,85 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ no ano de 2020 comparada à média de 2018 e 2019. Ainda no estado de São Paulo, na cidade de Cubatão, em 2019 a concentração de NO_2 foi igual a $5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ e entre $3,0$ a $3,5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ em 2020. Contudo, no ano de 2021 houve um aumento significativo neste valor, subindo para faixa de $5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$. Além disso, as cidades de Santos, São Vicente, São Bernardo do Campo, Embu das Artes, Itapevi, Taboão da Serra e Guarujá também tiveram concentrações na faixa de $5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ no ano de 2019. Contudo, no ano seguinte em Santos esse valor diminuiu para o nível de $2,5$ - $3 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$, e no município de São Vicente atingiu $3,5$ - $4 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$. Porém, no ano de 2021 tanto Cubatão, como Santos e São Vicente, voltaram a ter taxas iguais ou superiores a $5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$.

Os municípios do Rio de Janeiro com os maiores índices de concentração do gás no período de 2017 a 2021 são apresentados na Figura 4:

Figura 4 - Concentração média de dióxido de nitrogênio no estado do Rio de Janeiro.



Elaboração: Autores.

A Tabela 1 ilustra os resultados onde se notam as variações mais expressivas na concentração de NO_2 no estado do Rio de Janeiro nas cidades de Japeri, Magé e Niterói:

Tabela 1 - Alteração nos níveis de concentração de dióxido de nitrogênio em três cidades localizadas no Rio de Janeiro:

Cidade	Variação da concentração de NO_2 ($1/\text{cm}^2$)		
	Ano referência		
	2019	2020	2021
Japeri	3 e^{+15}	$2,5 - 3 \text{ e}^{+15}$	$3,5 \text{ e}^{+15}$
Magé	4 e^{+15}	2 e^{+15}	3 e^{+15}
Niterói	$4,5 \text{ e}^{+15}$	2 e^{+15}	3 e^{+15}

Elaboração: Autores a partir dos dados obtidos em NASA (2021).

É possível observar uma diminuição da poluição no período de 2020 em relação ao ano anterior, enquanto em 2021, pode-se ressaltar que houve uma elevação nestes locais. Na cidade de Magé (Tabela 1), por exemplo, nota-se uma queda de 50%, assim como em Quito (Equador) e Medellín (Colômbia), que tiveram uma redução de mais de 50% no NO_2 após o início de medidas de restrição rigorosas em meados de março, de acordo com estudo desenvolvido por Keller *et al.* (2021). Enquanto, nas cidades de Duque de Caxias e Nova Iguaçu, aponta-se reduções similares, com índices que estão na faixa de $3 - 3,5 \text{ e}^{+15}$ ($1/\text{cm}^2$) em 2019 a $2,5 \text{ e}^{+15}$ ($1/\text{cm}^2$) no que tange ao ano posterior, voltando a níveis mais elevados novamente de $4 - 4,5 \text{ e}^{+15}$ ($1/\text{cm}^2$) no último ano.

Então, os resultados do presente estudo vão ao encontro com a literatura que indica uma redução na poluição atmosférica em ambos estados no período de bloqueios (MARINHO e FOROUTAN, 2020). De acordo com Schindler *et al.* (2020), os níveis de concentração de NO_2 no estado de São Paulo no ano de 2020 apontam que as restrições à atividade humana corroboraram para uma redução em torno de 35,4% e 36% no estado Rio de Janeiro, em relação aos anos de 2015 a 2019.

Nestes estados, em nível municipal, no trabalho de Siciliano *et al.* (2020a), foram mostradas reduções entre 9,1% a 41,8% nas cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro. Já em estudo realizado por Dantas *et al.* (2020), que avaliaram os impactos da pandemia COVID-19 na qualidade do ar na cidade do Rio de Janeiro nas regiões do Irajá e Bangu no período de 2 de março de 2020 a 16 de abril de 2020, os resultados indicaram uma redução de 1,8% da concentração de NO_2 em Bangu e um aumento de 28% no Irajá. Os autores salientam que essa elevação pode ser atribuída à pequena adesão das medidas de prevenção da pandemia no município, que continuou com fluxo de veículos

e pessoas intenso mesmo durante a quarentena.

Por fim, no que concerne às demais cidades do país com variações expressivas de NO_2 , no Sul do Brasil, mais precisamente localizado no Paraná, próximo à capital do estado Curitiba, o município de São José dos Pinhais demonstra índices próximos a $2,5\text{-}3 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ em 2019, e $1,5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ no ano de 2020, registrando uma redução média próxima de 55 (50-60) % em relação ao período anterior aos bloqueios, valor próximo ao observado nas cidades indianas de Mumbai (57%) e Amedabad (56%), no trabalho de Siddiqui *et al.* (2021). Porém, em 2021 ocorre um aumento do índice de dióxido de nitrogênio para faixa de $2,5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$.

Ainda na região Sul do país, no estado do Rio Grande do Sul, adotou-se um Modelo de Distanciamento Controlado (MDC) com quatro estágios diferentes de medidas de distanciamento com base na restrição das atividades humanas, representadas pelas cores amarelo, laranja, vermelho e preto (ULGUIM *et al.*, 2021). No que diz respeito às concentrações do gás no mesmo, localizada na região metropolitana de Porto Alegre, a cidade de Canoas obteve níveis de redução do poluente próximos a $2,5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$, $1,5 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ e $2 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$ nos anos de 2019, 2020 e 2021, respectivamente. Esses resultados indicam valores equivalentes a uma mitigação de 40% no ano de 2020 com o período pré-bloqueio, resultado similar ao apontado por Hashim *et al.* (2021), em que as emissões de NO_2 foram reduzidas em até 35 a 40% na cidade de Bagdá no Iraque, também em contraste com o momento pré-bloqueio. No tocante às emissões de gases de efeito estufa no município, de acordo com o Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), desenvolvido pelo Observatório do Clima (OC):

Em 2018, Canoas lançou 2.613 mil tCO₂equivalente para atmosfera, sendo que cerca de 93% foram provenientes do setor de energia, 6% relacionado ao segmento de resíduos, e 1% advindo da mudança de uso da terra e florestas. Dentro do setor energético, a produção de combustíveis representa 53,5% destas, enquanto os transportes e a geração de eletricidade correspondem por 32,3% e 9,2%, na de vida ordem (OC, 2018).

Nesse contexto, a introdução de mecanismos regulatórios e acordos nacionais e internacionais para redução de emissões e da geração de eletricidade a carvão têm sido os principais fatores no progresso do Canadá, por exemplo, na redução de emissões de NO_2 (CUDDIHY *et al.*, 2005). Tin *et al.* (2022) analisou as tendências das emissões de NO_2 do setor de eletricidade dependente de combustível fóssil do país no período de 2008 a 2017 avaliando as emissões de cada província no processo de mudança de combustíveis fósseis para energia limpa em relação à geração de eletricidade, bem como as políticas e incentivos dos níveis internacional, federal e provincial foram avaliados para explicar os caminhos de transição. Além das políticas de atração de mercado, a adoção de uma combinação de fontes/tecnologias de geração de energia limpa e renovável tais

como eólica, hídrica e solar é uma estratégia importante e o cenário mais promissor em termos de transição energética e esforços de redução de emissões a baixo custo (TIN *et al.*, 2022; DAVIS *et al.*, 2020).

De modo geral, os estudos desenvolvidos em outras regiões tanto do território brasileiro quanto mundial, durante o período de bloqueios, também indicaram uma diminuição na concentração de dióxido de nitrogênio. Logo, essas medidas alternativas simples baseadas no estabelecimento de cores, alternação das placas de carro e dias da semana, dentre outras, foram eficazes na mitigação de GEE nos bloqueios que ocorreram, mostrando que estes também podem servir como programa ou ferramenta para minimização desses gases (DE SOUZA *et al.*, 2021).

CONCLUSÃO

Nota-se que foi possível obter resultados significativos para o monitoramento das concentrações de dióxido de nitrogênio. Nesse sentido, o *software* QGIS e a ferramenta Giovanni atreladas ao Sistema de Informações Geográficas, auxiliaram na elaboração dos mapas a fim de promover maior qualidade nos produtos gerados e consequentemente melhorar a análise visual da distribuição espacial e temporal de NO_2 na atmosfera. Neste estudo, durante o período de bloqueios, foi observada a redução da poluição atmosférica em todas as cidades monitoradas no ano de 2020 em relação aos anos anteriores, e posteriormente o aumento novamente, visto a flexibilização nas medidas de restrição no ano de 2021. Ainda, os índices de variação da concentração de NO_2 mais significativos, em torno de $2 \text{ e}^{+15} (1/\text{cm}^2)$, foram constatados nas cidades onde se localizam os maiores centros urbanos do país, no estado de São Paulo e do Rio de Janeiro.

A transição energética do Brasil, com a substituição de fontes fósseis em sua matriz para fontes limpas e renováveis como a eólica e solar, tem potencial para diminuir as emissões de NO_2 . Contudo, ainda se faz necessário pensar em soluções em longo prazo para reduzir mais esses índices, mesmo após o término da pandemia de COVID-19. Para que isso ocorra, o incentivo às políticas públicas ambientais que visam a diminuição da poluição atmosférica torna-se imprescindível, bem como a conscientização da população e a realização de fiscalização e monitoramento necessários pelos órgãos responsáveis.

O efeito induzido pelos bloqueios no setor industrial e de transporte revelou melhorias na qualidade do ar na área analisada, demonstrando sua eficácia como programa, ou ação alternativa para mitigação de poluentes. Entretanto, se faz necessário haver maior proatividade e estratégias sustentáveis para minimizar os níveis de poluição atmosférica no país. Portanto, os resultados

obtidos no presente trabalho podem contribuir para auxiliar os formuladores de políticas de preservação ambiental e tomadores de decisão a avaliar, prever e modelar a qualidade do ar a fim de melhorar a saúde humana e os problemas ambientais relacionados a esta problemática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKER, J. G.; LEPTOUKH, G. Online analysis enhances use of NASA Earth science data. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, v. 88, n. 2, p. 14-17, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007EO020003>.

ADAMS, M. D. Air pollution in Ontario, Canada during the COVID-19 State of Emergency, **Science of the Total Environment**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140516>.

BAO, R.; ZHANG, A. Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China. **Science of the Total Environment**, v. 731, n. 1954, p. 139052, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139052>.

BERMAN, J. D.; EBISU, K. Changes in US air pollution during the COVID-19 pandemic. **Science of the total environment**, v. 739, p. 139864, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scitotenv.2020.139864>.

COLLIVIGNARELLI, M. C.; DE ROSE, C.; ABBÀA, A.; BALDI, M. BERTANZA, G.; PEDRAZZANI, R.; SORLINI, S.; MIINO, M.C. Analysis of lockdown for CoViD-19 impact on NO_2 in London, Milan and Paris: What lesson can be learnt?. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 146, p. 952-960, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.029>.

COCCIA, M. Diffusion of COVID-19 outbreaks: the interaction between air pollution-to-human and human-to-human transmission dynamics in hinterland regions with cold weather and low average wind speed. **SSRN Electronic Journal**, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3567841>.

BENCHRIF, A.; WHEIDA, A.; TAHRI, M.; SHUBBAR, R. M.; BISWAS, B. Air quality during three covid-19 lockdown phases: AQI, PM2. 5 and NO_2 assessment in cities with more than 1 million inhabitants. **Sustainable Cities and Society**, v. 74, p. 103170, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103170>.

BUCCO, M. V. S. **Construção e Testes de Validação de Amostradores Passivos para Dióxido de Nitrogênio e Ozônio**. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (em parceria com o SENAI-PR e a Universität Stuttgart, Alemanha), Curitiba, 2010.

CAMPOS, V. P.; CRUZ, L. P. S.; ALVES, E. M.; SANTOS, T. S.; SILVA, A. D.; DOS SANTOS, A. C.; LIMA, A. M.V.; PAIXÃO, C. S.; SANTOS, D. C. M. B.; BRANDÃO, D. S.; ANDRADE, E. J. S.; MOREIRA JR., J. I.; CONCEIÇÃO, K. C. S.; RAMOS, M. S.; PONTES, M. C. G.; DO AMARAL, M. F.; MATTOS, R. R. Monitoramento atmosférico passivo de SO_2 , NO_2 e O_3 em áreas urbanas e de influência industrial como prática de química ambiental para alunos de

graduação. **Quím. Nova**, vol. 29, n.4, p. 872-875, 2006.

CARVALHO, A.; MORAES NETO, J. M. Estudo da degradação da ambiental da Bacia hidrográfica do açude Soledade no Estado da Paraíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBS, 15, 2011, Curitiba. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2011. p. 1129-1136.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **QUALAR - Sistema de Informações de Qualidade do Ar**.2020. Disponível em: <https://servicos.cetesb.sp.gov.br/qa/>. Acesso em 20 out. 2021.

CUDDIHY, J.; KENNEDY, C.; BYER, P. Energy use in Canada: environmental impacts and opportunities in relationship to infrastructure systems. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 32, n. 1, p. 1-15, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1139/l04-100>.

DAVIS, M.; MORONKEJI, A.; AHIDUZZAMAN, M.; KUMAR, A. Assessment of renewable energy transition pathways for a fossil fuel-dependent electricity-producing jurisdiction. **Energy for Sustainable Development**, v. 59, p. 243-261, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.10.011>.

DOMINKOVIĆ, D. F.; BAČEKOVICIĆ, I.; PEDERSEN, A. S.; KRAJAČIĆ, G. The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1823-1838, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.117>.

DANTAS, G.; SICILIANO, B.; FRANÇA, B. B.; DA SILVA, C. M.; ARBILLA, G. The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 729, p. 139085, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scitotenv.2020.139085>.

DE SOUZA, A.; ABREU, M. C.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; AVIV-SHARON, E.; FERNANDES, W. A.; ARISTONE, F; Variations in the tropospheric concentration of NO_2 in the central west of Brazil, MS, and their relationship with the COVID-19. **Air Quality, Atmosphere & Health**, p. 1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01121-8>.

FREITAS, A. R. R.; NAPIMOOGA, M.; DONALISIO, M. R. Análise da gravidade da pandemia de Covid-19. **Epidemiol Serv. Saúde**, Brasília, v. 29, n. 2, p. 1-5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742020000200008>.

GAUTAM, S. The influence of COVID-19 on air quality in India: a boon or inutile. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 104, n. 6, p. 724-726, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02877-y>.

GONZAGA, A. C.; FREITAS, A. C. V. Analysis of the relationship between weather conditions, air pollution and viral respiratory infections: the COVID-19 case. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e591985942, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5942>.

GRAYSON, M. Energy transitions. **Nature**, v. 551, n. 7680, p. S133-S133, 2017. DOI: 10.1038/d41586-017-07507-y.

HASHIM, B.M.; AL-NASERI, S.K.; AL-MALIKI, A.; AL-ANSARI, N. Impact of COVID-19 lockdown on NO₂, O₃, PM2.5 and PM10 concentrations and assessing air quality changes in Baghdad, Iraq. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 141978, 2021.

HUANG, S.; LI, H.; WANG, M.; QIAN, Y.; STEENLAND, K.; CAUDLE, W. M. Long-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: a systematic review and meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 776, p. 145968, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145968>.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal – Acesso ao produto - 2021- Brasil –Arquivo Municípios**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 02 nov. 2021.

KELLER, C. A.; EVANS, M.J.; KNOWLAND, K.E.; HASENKOPF, C.A.; MODEKURTY, S. LUCCHESI, R.A.; ODA, T.; FRANCA, B.B.; MANDARINO, F.C.; SUÁREZ, M.V.D.; RYAN, R. G.; FAKES, L.H.; PAWSON, S. Global impact of COVID-19 restrictions on the surface concentrations of nitrogen dioxide and ozone. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, n. 5, p. 3555-3592, 2021.

KROTKOV, N. A.; MCLINDEN, C. A.; LI, C.; LAMSAL, L. N.; CELARIER, E. A.; MARCHENKO, S. V.; SWARTZ, W. H.; BUCSELA, E. J.; JOINER, J.; DUNCAN, B. N.; BOERSMA, K. F.; VEEFKIND, J. P.; LEVELT, P. F.; FIOLETOV, V. E.; DICKERSON, R. R.; HE, H.; LU, Z.; STREETS, D. G. Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2014, **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 15, p. 26555-26607, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/acpd-15-26555-2015>.

MARINHO, R. C. B. F.; FOROUTAN, H. Atmospheric pollutant levels in Southeast Brazil during COVID-19 lockdown: combined satellite and ground-based data analysis. **AGU Fall Meeting Abstracts**, p. A079-03, 2020.

MANTOVANI, I. S.; PIMENTA, A. F.; BIELESKI, I. C.; BEAL, A.; MARTINS, L. D.; SOLCI, M. C. O impacto de medidas restritivas devido à pandemia por COVID-19 nas concentrações de poluentes atmosféricos em cidade de médioporte. **Conjecturas**, v. 21, n. 6, p. 54-69, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.53660/CONJ-294-316>.

MARTINS, E. M.; FORTES, J. D. N.; RIBEIRO, G. P.; PEREIRA, M. F. M. Utilização de Sistema de Informação Geográfica como ferramenta para gestão do monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 43-50, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522014019010001237>.

MATHIESEN, B. V., LUND, H., CONOLLY, D., WENZEL, H., ØSTEGAARD, P. A., MÖLLER, B., NIELSEN, S.; RIDJAN, I.; KARNØE, P.; SPERLING, K.; HYELPLUND, F. K. Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. **Applied Energy**, v. 145, p. 139-154, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075>.

NAKADA, L. Y. K.; URBAN, R. C. COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 730, p. 139087, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139087>.

NASA, National Aeronautics and Space Administration. **Plataforma Giovanni**. Disponível em: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Acesso em: 2 nov. 2021.

OC, Observatório do Clima. **Sistema de Estimativas de Gases de Efeito Estufa – SEEG: RS – Canoas - 2018**. 2018. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territories/rs-canoas/card?year=2018&cities=true>. Acesso em: 11 fev. 2022.

OGEN, Y. Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. **Science of the Total Environment**, v. 726, p. 138605, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138605>.

OTMANI, A.; BENCHRIF, A.; TAHRI, M.; BOUNAKHLA, M.; EL BOUCH, M.; KROMBI, M. H. Impact of Covid-19 lockdown on PM10, SO₂ and NO₂ concentrations in Salé City (Morocco). **Science of the total environment**, v. 735, p. 139541, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scitotenv.2020.139541>.

PAÚL, F. 'Vivemos isolamento dentro do isolamento': como a pandemia é enfrentada na Antártida, único continente sem casos. **BBC News Brasil**, 24 abr. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-52275625>. Acesso em: 03 de nov. de 2021.

PINHEIRO, E. S.; DURIGAN, G. Dinâmica espaço-temporal (1962-2006) das fitofisionomias em unidade de conservação do Cerrado no sudeste do Brasil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 32, n. 3, p. 441-454, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-84042009000300005>.

SEEG, Sistema de Estimativa de Emissões de Gases do Efeito Estufa. Observatório do Clima. 2022. Disponível em <https://seeg.eco.br/>. Acesso em 03 fev. 2022.

SICILIANO, B.; DANTAS, G.; DA SILVA, C. M.; ARBILLA, G. Increased ozone levels during the COVID-19 lockdown: Analysis for the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 737, p. 139765, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139765>.

SICILIANO, B.; CARVALHO, G.; DA SILVA, C. M.; ARBILLA, G. The impact of COVID-19 partial lockdown on primary pollutant concentrations in the atmosphere of Rio de Janeiro and São Paulo Megacities (Brazil). **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 105, n. 1, p. 2-8, 2020b. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007%2Fs00128-020-02907-9>.

SIDDIQUI, A.; HALDER, S.; CHAUHAN, P.; KUMAR, P. COVID-19 Pandemic and City-Level Nitrogen Dioxide (NO₂) Reduction for Urban Centres of India. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 48, n. 7, p. 999-1006, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007%2Fs12524-020-01130-7>.

SCHINDLER, T. L.; DUNCAN, B.; LAMSAL, L.; JOINER, J.; YOSHIDA, Y.; MERSMANN, K.; GARCIA, M-J. V. NO₂ Decline Related to Restrictions Due to COVID-19 in South America ID:

4835. SVS Visualization. 2020. **NASA – Scientific Visualization Studio**. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4835>. Acesso em: 10 nov. 2021.

TIAN, X.; AN, C.; NIK-BAKHT, M.; CHEN, Z. Assessment of reductions in NO_2 emissions from thermal power plants in Canada based on the analysis of policy, inventory, and satellite data. **Journal of Cleaner Production**, p. 130859, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130859>.

UGUCIONE, C.; NETO, J. A. G.; CARDOSO, A. A. Método colorimétrico para determinação de dióxido de nitrogênio atmosférico com preconcentração em coluna de C-18. **Química Nova**, vol. 25, n. 3, p. 353-357, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000300003>.

ULGUIM, S. M.; TAVELLA, R. A.; DIAS, D.; RODRIGUES, F. M. Dinâmica dos Poluentes Atmosféricos e o Modelo de Distanciamento Controlado do Rio Grande do Sul para Controle da Pandemia da Covid-19. 2021.

WHO, World Health Organization. **Coronavirus disease 2019 (COVID-19) situation report-51**. 2020. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331475>. Acesso em: 22 out. 2021.

WU, X.; NETHERY, R. C.; SABATH, M. B.; BRAUN, D.; DOMINICI, F. Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States. **MedRxiv**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>.

ZHANG, K.; ZHAO, C.; FAN, H.; YANG, Y.; SUN, Y. Toward Understanding the Differences of PM 2.5 Characteristics Among Five China Urban Cities. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, p. 1- 10, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-019-00125-w>.