Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

A INFLUÊNCIA DO CLIMA NA CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO TROPOSFÉRICO NOS MUNICÍPIOS DO RIO GRANDE DO NORTE

The influence of climate on tropospheric Ozone Concentration in the municipalities of Rio Grande do Norte

La influencia del clima en la concentración de Ozono Troposférico en los municipios de Rio Grande do Norte

Maria Vitória Oliveira dos Santos
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
mariavitoriaoliveira955@gmail.com

Francisco Jablinski Castelhano
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
francisco.castelhano@ufrn.br

Resumo: O objetivo desta pesquisa é identificar a configuração espacial da concentração do ozônio troposférico (O_3) no estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil, e analisar qual é a influência dos fatores meteorológicos nos resultados encontrados. Para tal, foram utilizados dados das concentrações de ozônio retirados do SISAM, programa do INPE, para um período de 16 anos (2003 a 2019) em escala temporal diária para cada município do estado. Também foram utilizados dados meteorológicos para o mesmo período e escala, como tais quais: temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento. O método de análise é predominantemente cartográfico e revelou uma forte influência dos regimes de chuvas, sendo observada uma maior concentração do poluente no clima semiárido e nas épocas de estiagem.

Palavras-chave: Poluição do Ar. Fatores Meteorológicos. Cartografia. Nordeste Brasileiro.

Abstract: The objective of this research is to identify the spatial configuration of tropospheric ozone (O_3) concentration in the state of Rio Grande do Norte, northeast Brazil and analyze the influence of meteorological factors on the findings. For this purpose, ozone concentration data from SISAM, an INPE program, were used for a 16-year period (2003 to 2019) on a daily temporal scale for each municipality in the state. Meteorological data for the same period and scale were also employed, including: temperature, precipitation, Relative Humidty, and wind speed. The analysis method is

predominantly cartographic and revealed a strong influence of rainfall patterns, with a higher concentration of the pollutant being observed in the semi-arid climate and in times of drought.
Keywords: Air Pollution. Meteorological Factors. Cartography. Brazilian Northeast.

Resumen: El objetivo de esta investigacion es identificar la configuración espacial de la concentración de ozono troposférico (O_3) en el estado de Rio Grande do Norte, en el noreste de Brasil, y analizar la influencia de los factores meteorológicos en los resultados obtenidos. Para ello, se utilizaron datos de concentraciones de ozono extraídos del SISAM, un programa del INPE, durante un período de 16 años (2003 a 2019) en una escala temporal diaria para cada municipio del estado. También se utilizaron datos meteorológicos para el mismo período y escala, que incluyen: temperatura, precipitación y velocidad del viento. El método de análisis es predominantemente cartográfico y reveló una fuerte influencia de los regímenes de lluvias, observándose una mayor concentración del contaminante en el clima semiárido y en las épocas de sequía.
Palabras clave: Contaminación del aire. Factores meteorológicos. Cartografía. Noreste de Brasil.

Submetido em: 30/11/2024
Aceito para publicação em: 08/04/2024
Publicado em: 16/04/2024

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar pode ser definida pela entrada de qualquer substância diferente daquela ao meio ao qual é inserida, que cause algum tipo de dano a ele, podendo ter origem antrópica ou natural. Em relação às antrópicas, pode-se classificá-las entre fontes de emissão estacionárias (por indústrias, usinas elétricas, aterros sanitários, combustão), ou móveis, inserindo a questão da mobilidade na problemática (AYOADE, 1986).

Os poluentes também podem, ainda, ser divididos em primários e secundários. Os primários são aqueles lançados na atmosfera diretamente das fontes emissoras, como as já citadas, já os secundários, surgem na atmosfera após reações químicas a partir de elementos e poluentes já antes existentes, como o ozônio (O_3) (PIMENTA, 2010).

O ozônio, foco deste estudo, é um poluente formado a partir de reações fotoquímicas entre os raios solares e outros poluentes da atmosfera, como os compostos orgânicos voláteis (COVs) - com exceção do metano -, o monóxido de carbono (CO) e, sobretudo, os óxidos de nitrogênio (NO e NO_2).

O exemplo a seguir mostra a rota principal de formação e dissociação do ozônio troposférico. Nele o dióxido de nitrogênio (NO_2) é alterado em reação à incidência da radiação ultravioleta (UV), gerando o monóxido de nitrogênio (NO) e o oxigênio atômico (radical livre). Logo após, o oxigênio atômico reage com o oxigênio molecular e forma o ozônio (O_3). Por fim, esse ozônio também irá sofrer reação de fotólise e voltará a formar o NO_2 e O_2.

EX: $NO_2 + UV + VOC's = NO + O$

$O + O_2 = O_3$

$NO + O_3 = NO_2 + O_2$

Esse processo de formação e dissociação do ozônio é natural e, por vezes, benéfica, como no caso do ozônio formado na estratosfera na chamada camada de ozônio. Já na troposfera, essas reações tendem a acontecer em equilíbrio, mas com o aumento de NOx, influenciada pelos COVs, essa dinâmica entra em desequilíbrio e traz diversas consequências, tanto para a saúde como para a natureza, em função do incremento na concentração deste composto, como doenças respiratórias, cardiovasculares, aumento da mortalidade infantil,

irritação nos olhos, aquecimento do ar, perda da produção agrícola, entre outros (COUTO, 2011).

Deve-se atentar que não somente as emissões de poluentes exercem influência sobre as concentrações de ozônio em cada lugar, visto que, conforme apresentam alguns estudos, os poluentes podem ser transportados longe de suas fontes emissoras e concentrar-se em níveis maiores que próximo das fontes, de fato.

Um exemplo que se atenta a isto, se apresenta no estudo da identificação das fontes precursoras de ozônio em Sorocaba –SP (ALTUNES, AGUILAR e CAMARGO, 2018). Os resultados obtidos revelaram que, nos dias em que a concentração de ozônio ultrapassou o padrão de qualidade estabelecido pelo CONAMA sobre o poluente, a direção dos ventos predominava nas direções NE ou do quadrante WSW-NNW, indicando a influência de plumas de poluição vindas de grandes centros (Jundiaí e Campinas) e de região com grande foco de queimadas utilizadas na agricultura. Além de ocorrerem sempre nos meses de verão e primavera, meses em que a incidência solar ocorre de maneira mais intensa.

Isso deve-se ao fato de que, como propõe Ayoade (1986), a intensidade da poluição atmosférica em cada local é definida pelas emissões de poluentes e condicionadas pelos índices de dispersão e diluição dos mesmos, através dos parâmetros meteorológicos. Como por exemplo, destaca-se a forte relação entre o nível de ozônio e a incidência solar, que tendem a acontecer de forma proporcional, onde os períodos em que a incidência solar aumenta, o ozônio também aumenta, sendo esse um exemplo do qual as concentrações de ozônio são influenciadas pelos fatores meteorológico de cada lugar e época do ano (NEVES,2009).

Isso pode ser atestado em pesquisas como o estudo da formação e concentração do Ozônio no município de Lamarão do Passé – BA (ALVES e ALVES, 2019) que além de sofrer a influência das emissões vindas do Polo Industrial de Camaçari condicionadas pela direção do vento e pela topografia da região, identificou, através de dados registrados a cada 15 minutos, que a tendência da formação do O_3 em maiores concentrações ocorre entre o intervalo das 10:00 ás 13 horas, período em que a radiação solar é mais intensa.

Além destes, outros estudos que buscaram medir a influência de fatores meteorológicos na ocorrência de episódios de altas concentrações de Ozônio apontaram a ocorrência de tempos com ventos fracos, céu claro, baixa umidade do ar, altas temperaturas

e incidência de radiação solar como condições favoráveis à formação e concentração de ozônio (CARVALHO et al., 2012).

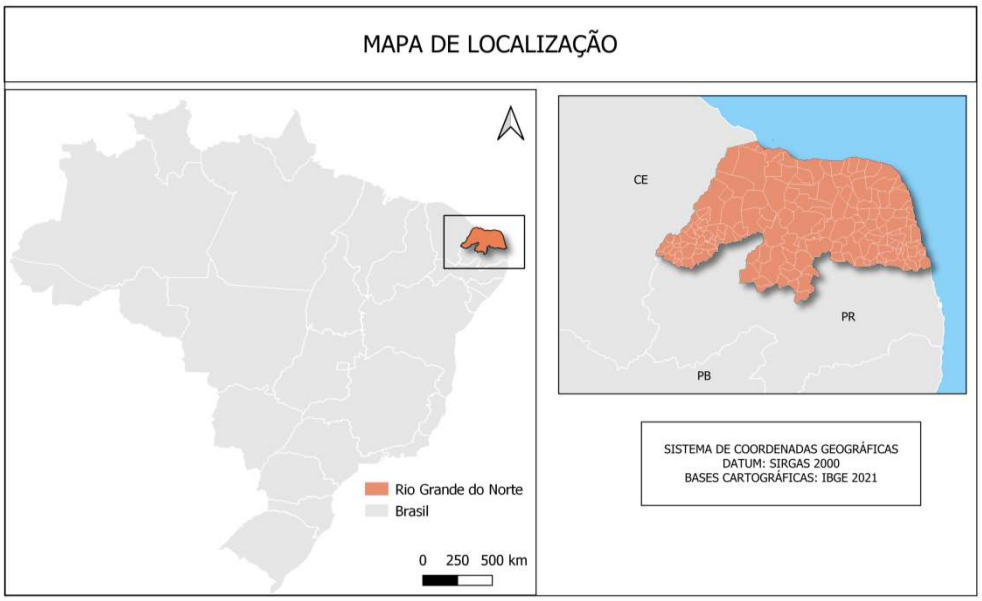
Posto isso, Derisio (2012) lista a temperatura, precipitação e ventos como as principais variáveis condicionantes nas concentrações de poluentes. A temperatura regula o nível de correntes convectivas que auxiliam na elevação e dispersão de partículas, a precipitação age aumentando a deposição e "limpando" o ar, e os ventos atuam diretamente no transporte e dispersão dos poluentes (CASTELHANO, 2020). Sendo assim, dependendo do tempo e da época do ano, a mesma emissão de poluição pode findar-se em concentrações diferentes em cada lugar.

À vista disso, essa pesquisa pretende analisar a influência climática na distinção de concentração de O_3 nos municípios do Rio Grande do Norte ao longo do ano, observando as modificações em cada época do ano através do método cartográfico, com base na análise do clima e de estudos referentes à temática.

2. METODOLOGIA

O estado do Rio Grande do Norte se localiza no nordeste do Brasil (Figura 1) e contém 167 municípios, com uma área de 52.809,599 km² e uma população estimada de 3.302.406 habitantes (IBGE, 2022). É caracterizado por um clima quente, destacando-se dois climas distintos, o subúmido, a leste do estado, banhada pelo oceano atlântico, e o semiárido, no interior e oeste do estado.

Figura 1 - Mapa de localização.



Fonte: IBGE, 2021

Por estar localizado próximo à linha de convergência intertropical (ZCIT), possui um clima quente com altas temperaturas e insolação o ano todo, com baixa amplitude térmica, apenas variando o índice pluviométrico ao longo do ano e da localidade, sendo essa variável considerada a mais relevante.

Além de apresentar uma variação sazonal inidentificável, a área de estudo é marcada por altos índices pluviométricos no litoral, e baixos índices no interior do estado, formando dois climas distintos predominantes no estado, subúmido e semiárido (LUCENA; JÚNIOR e STEINKE, 2018).

Com isso, a sazonalidade anual é mais bem identificada pelos períodos chuvosos e de secas do que pelas estações tradicionais, sendo essa variável condicionada por alguns sistemas atmosféricos tais quais: os Complexos Convectivos de Mesoescala, os VCANs e as Ondas de Leste que geram as chuvas no litoral, contudo, essa umidade quase não alcança o interior semiárido (como a depressão sertaneja), sofrendo influência do relevo, pelo planalto da Borborema (LUCENA; JÚNIOR e STEINKE, 2018).

A partir disso, para a realização desta pesquisa, que visa estabelecer uma ponte entre clima e a concentração de ozônio na atmosfera, utilizou-se de dados de concentração deste poluente, disponibilizados pelo Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde

(SISAM), vinculado ao Instituto Nacional Pesquisas Espaciais (INPE), coletados diariamente em cada município do estado por meio de satélite. Os dados coletados abarcam um período de 16 anos, de 2003 a 2018.

As concentrações de poluição atmosférica de O_3 do SISAM originam-se de Reanálises do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) (do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo - ECMWF). Os dados apresentavam resolução espacial de 0,125° (aproximadamente 12,5 km), abrangendo o Brasil, e resolução temporal de 6 h, incluindo estimativas diárias para 00, 06, 12 e 18 UTC - Tempo Universal Coordenado. Foi calculada a concentração média diária para cada poluente.

A validação dos dados do CAMS foi feita por Galbally et al. (2013) comparando os dados de reanálise com medições de superfície de observações do programa Global Atmosphere Watch (GAW) da OMM. Os resultados sugerem que os dados CAMS reproduzem os valores médios mensais e a variabilidade sazonal dos poluentes de uma forma muito aceitável (Inness et al., 2019). É possível encontrar aplicações destes conjuntos de dados de poluição em Castelhano et al. (2023), Cobello et al. (2023) e Requia e Castelhano (2023).

Após isso, o tratamento dos dados foi executado através do software Rstudio, onde realizaram-se médias mensais e anual dos dados de concentração do poluente para cada município. Em seguida, os dados foram tabelados, para uma análise ampla e em vista do desafio de examinar um banco de dados de 167 municípios, foram elaborados mapas coropléticos no software Qgis, a fim de visualizar os níveis de concentrações de ozônio espaço/temporalmente no estado.

Com isso, observou-se uma distinção curiosa da configuração dos níveis de concentração do poluente ao longo do ano, que logo associou-se, a partir da pesquisa bibliográfica, à influência dos fatores meteorológicos próprios do clima do Rio Grande do Norte. Sendo assim, adicionou-se a pesquisa dados de temperatura, precipitação e velocidade do vento, referentes a mesma escala temporal e processando-os com o mesmo método cartográfico de análise, através das mesmas ferramentas, de forma a possibilitar uma análise comparativa entre as concentrações do poluente e os fatores climáticos.

A escolha das variáveis deu-se por estar em consenso com o que Derisio (2012) afirmou ser os fatores meteorológicos que mais exercem influência sobre os processos de diluição e dispersão de poluentes, em conjunto com diversas pesquisas sobre a temática. No

entanto, elevando a análise para explorar os resultados em escala estadual, não encontrada na pesquisa bibliográfica, atribuindo um caráter inovador, mas desafiador ao estudo.

Os dados meteorológicos foram coletados do modelo ERA-Interim (Berrisford et al., 2011; Dee et al., 2011) que consiste em uma reanálise atmosférica global realizada pelo ECMWF. O conjunto de dados meteorológicos também foi recuperado do SISAM com resolução temporal de 6 horas e resolução espacial de 12,5 km. Tal qual aos dados de poluição atmosférica, foram calculadas as médias diárias de todo o período de interesse para cada variável climática e, em seguida, agregadas por município. Os valores acima do percentil 95 foram removidos e ambos os conjuntos de dados foram agregados em uma escala diária para remover os efeitos de outliers.

3. DESENVOLVIMENTO

Conforme apresenta Derisio (2012), “a poluição numa região ocorre em função das atividades da comunidade aí presente e das condições atmosféricas, aos quais, por sua vez, são funções do tempo”. A partir disso, primeiramente, se discutirá a variação espacial e anual do poluente, e consequentemente, o possível nível de influência de cada variável com base nos resultados obtidos e nas bibliografias utilizadas.

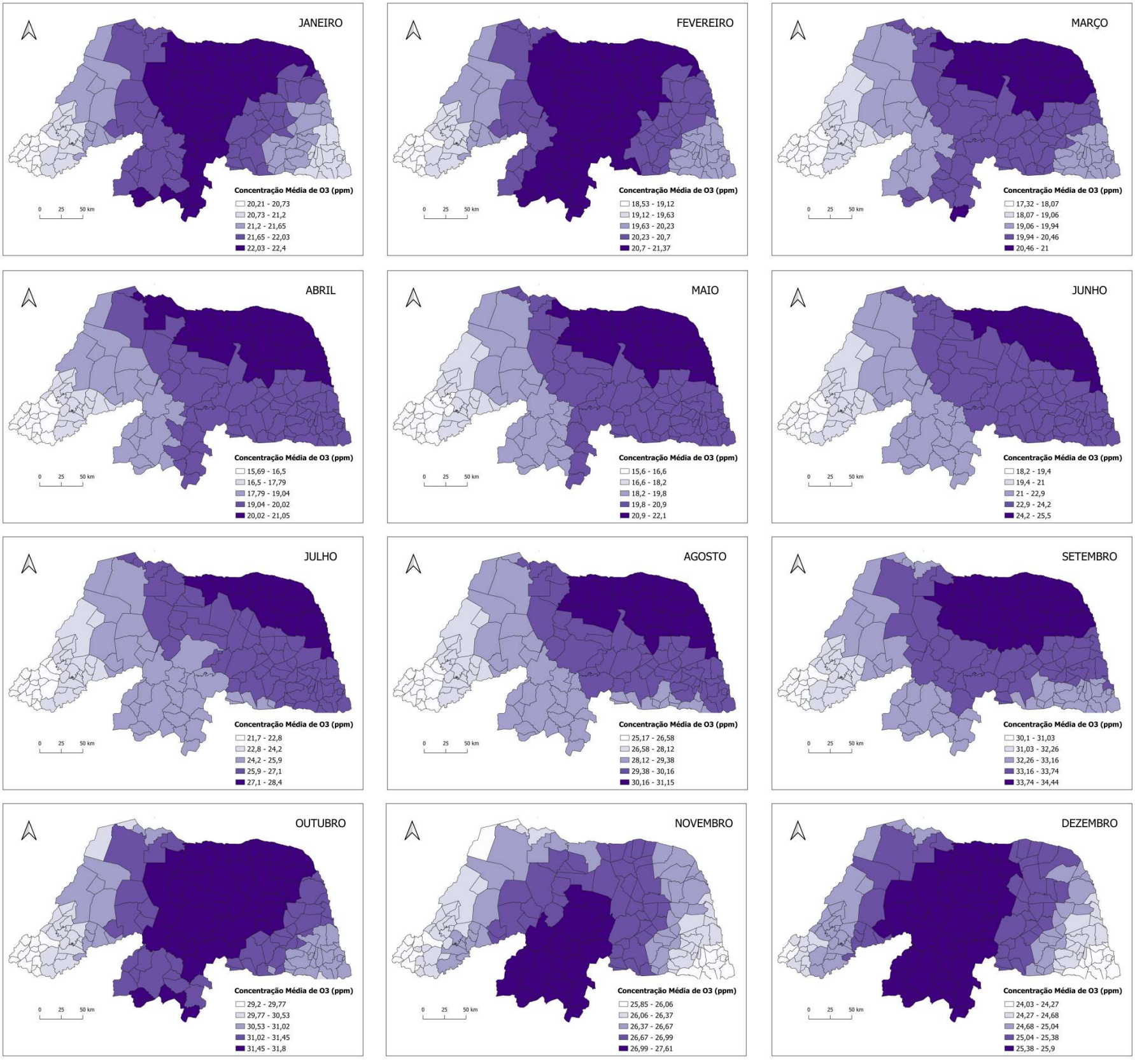
3.1. Ozônio

A partir da análise dos resultados encontrados, nota-se que ao longo do ano os níveis de concentração de ozônio se configuram de forma distinta durante os meses, como apresentado no mosaico que compõe a figura 2 abaixo. Nela é possível identificar duas concentrações de maior foco do poluente ao longo do ano.

Uma que se estende do centro do estado a faixa Norte, correspondente a extensão, principalmente, do Centro potiguar, e parte do Agreste e do norte do Leste que se mantém entre os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro (cinco meses), com um foco mais exclusivo no centro, que ganha protagonismo, nos meses de novembro e dezembro. Com concentrações que vão de, em média, de 18,50 ppm (em fevereiro) a 31,80 ppm (em outubro).

E nos meses de março a setembro, observa-se um foco mais concentrado na faixa Norte dessas regiões (centro e agreste), estendendo-se, nesse caso, mais a costa Leste do estado, e até um pouco do norte do Oeste. Com concentrações entre 15,06 ppm (em maio) e 34,44 ppm (em abril), possuindo, logo, uma amplitude de concentração ozônio maior durante os sete meses de foco mais ao norte, abarcando dos meses de menor concentração aos de maior concentração.

Figura 2 - Mosaico de mapas de Concentração média mensal de O_3.



As médias máximas do poluente estão nos meses de agosto (25,17 – 31,15 ppm), setembro (30,10 - 34,44 ppm) e outubro (29,20 - 31,80 ppm), correspondentes ao período de inverno/primavera. E os meses de médias mínimas mais altas são os meses de setembro, outubro e novembro (25,85 – 27,61 ppm). Felizmente, esses valores não ultrapassam o limite de 71,4 ppb estabelecido pelo CONAMA ou o 51 ppb permitido pela ONU para manter a qualidade do ar.

Já as médias mínimas encontram-se nos meses de março (17,32 – 21 ppm), abril (15,69 – 21,05 ppm) e maio (15,06 – 22,10 ppm), no verão/outono, acompanhando as médias máximas com valores menores, que se encontram em fevereiro (18,53 – 21,37 ppm), março e abril (Figura 2). Configurando essa variação anual de concentração observada na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Médias mensais máximas e mínimas de O3 no RN

MESES	MÉDIA MÍNIMA (ppm)	MÉDIA MÁXIMA (ppm)
JANEIRO	20,21	22,40
FEVEREIRO	18,53	21,37
MARÇO	17,32	21,00
ABRIL	15,69	21,05
MAIO	15,06	22,10
JUNHO	18,20	25,50
JULHO	21,70	28,40
AGOSTO	25,17	31,15
SETEMBRO	30,10	34,44
OUTUBRO	29,20	31,80
NOVEMBRO	25,85	27,61
DEZEMBRO	24,03	25,90

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Através da tabela, constata-se claramente que o segundo semestre do ano é o que possui a atmosfera mais poluída pelo ozônio atmosférico, durante as estações de inverno e primavera. Por conseguinte, no período de verão e outono, nos meses do primeiro semestre do ano, encontramos valores mais baixos do poluente, logo, um ar menos poluído.

Portanto, ao analisar os resultados, vê-se que as regiões que protagonizaram na concentração de ozônio foram o Centro potiguar e a faixa norte-leste do estado, enquanto o Oeste não se destacou em nenhum mês do ano. Além disso, viu-se que no segundo semestre do ano obtemos os valores mais altos do poluente, dentre os meses de maior poluição, observamos o foco de concentração migrar da faixa norte (agosto) até o Seridó (novembro), no sul do centro potiguar (Figura 2).

3.2. Precipitação

O estudo feito por Lucena, Júnior e Steinke (2018), sobre o comportamento hidroclimático do Rio Grande do Norte, apresenta três domínios climáticos no estado: o úmido (no Litoral leste), subumido (no Oeste potiguar) e semiárido (no Central Potiguar). Afirma que apesar de anos chuvosos ou secos, o ciclo pluviométrico se mantém o mesmo, comportamento esse que foi confirmado nesta pesquisa.

Os resultados obtidos nesse estudo revelaram uma média de precipitação acumulada mensal entre 2,1 mm nos locais de clima semiárido a 255 mm no litoral úmido. Foram identificados e classificados três períodos de chuvas interessantes para a pesquisa. Sendo eles um período de precipitação distribuída nas regiões do estado, outro de alta precipitação concentrada no litoral, e outra de baixa precipitação.

Tabela 2: Médias de precipitação acumulada mensal ao longo do ano.

MESES	MÉDIA MÍNIMA (mm)	MÉDIA MÁXIMA (mm)
JANEIRO	48,10	110,50
FEVEREIRO	87,70	149,80
MARÇO	92,80	156,50
ABRIL	116,80	171,60
MAIO	67,86	153
JUNHO	39	255
JULHO	14	176
AGOSTO	5,2	167,90
SETEMBRO	2,3	44,30
OUTUBRO	2,1	20,80
NOVEMBRO	2,2	17,40
DEZEMBRO	4,81	34,44

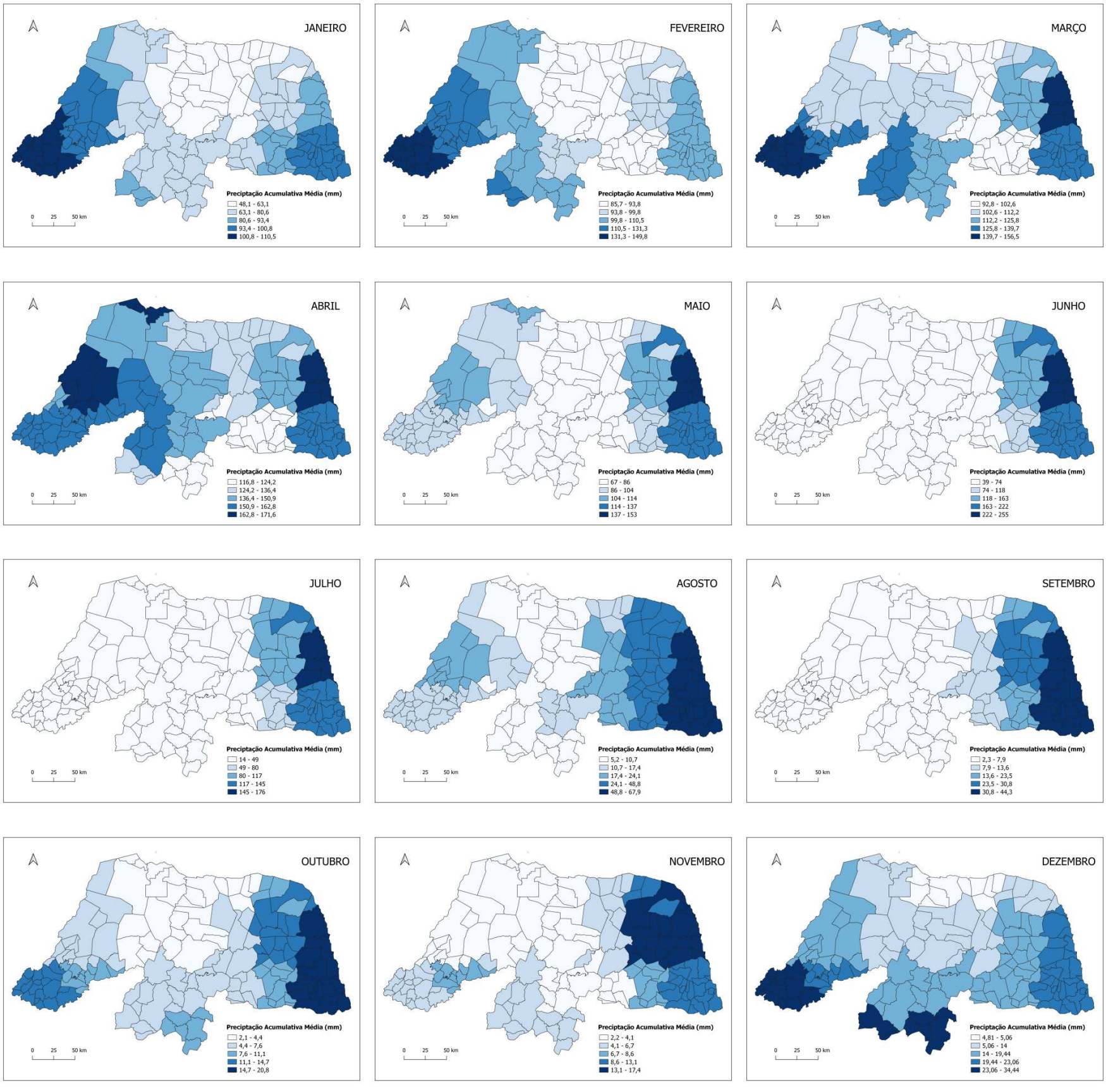
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O período de precipitação bem distribuída acontece entre janeiro e abril, com uma média acumulada de 48,10 mm (janeiro) a 171,60 mm em abril, mês mais chuvoso do ano, em que há ocorrência de chuva em quase todo o estado; sendo março e abril considerada a curta estação chuvosa, em decorrência da posição mais ao sul da ZCIT (LUCENA; JÚNIOR; STEINKE, 2018).

Já nos meses de maio a agosto, meses que atingem os maiores níveis de precipitação acumulada, com média de 5,20 mm à 255 mm, notamos uma alta amplitude entre média mínima e máxima. Isso deve-se ao fato que neste período as chuvas concentram-se no litoral, com baixas, ou quase nulas, precipitações no interior do estado (Figura 3).

Pode-se, ainda, identificar um período de baixa precipitação ou estiagem, que ocorre entre os meses de setembro a dezembro, com uma mínima de 2,1 mm e uma máxima de apenas 44,30 mm ao mês (Tabela 2). Observando a Figura 3, foi possível observar que a chuva concentrada no litoral vai de forma crescente, a partir do mês de outubro, espalhando-se e aumentando, até que em janeiro o ciclo sazonal de precipitação recomeça.

Figura 3 - Precipitação média mensal acumulada (mm).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

E como apresentado no estudo de Lucena, Júnior e Steinke (2018), e evidenciado nos resultados, a região mais chuvosa do estado é o Leste, seguido pelo Oeste, sendo o Centro potiguar o mais seco, com chuva concentrada em março e abril. Ainda, identificamos três períodos chuvosos com comportamentos distintos, marcado por chuvas bem distribuídas (fevereiro a abril) com o período chuvoso (março e abril); as chuvas concentradas no litoral leste (maio a agosto); e o períodos de estiagem (setembro a dezembro).

A partir disso, conseguiu-se estabelecer conexão com a variação do ozônio no estado. Pois os locais de maior foco coincidem com locais de baixa precipitação, de clima semiárido, como o Centro Potiguar. Ainda, notou-se a influência da sazonalidade anual do regime de chuvas sobre esses focos, onde, no segundo semestre, o período de baixa precipitação corresponde com os meses de maior poluição, e o período chuvoso condiz com os menores índices de ozônio (Tabela 1 e 2).

Em estudos realizados na região Metropolitana de São Paulo, associou-se à queda do ozônio em certos dias do ano a ação de uma frente fria que modificou o tempo calmo, com alta radiação solar e ausência de chuva, para um tempo nublado, (que diminuiu a incidência da radiação) e muita precipitação (CARVALHO et al., 2012).

Estudos como esse evidenciam a influência desta variável na dispersão dos poluentes, sobretudo na capacidade de diminuir a irradiação através da ação das nuvens e pela umidade inserida no ambiente que ajuda a dissipar os poluentes.

Vê-se que os meses de maior concentração de O_3 (ago, set, out) corresponde a meses de baixa precipitação, com precipitação acumulada, ou quase nulas, no centro potiguar e baixíssima no Norte. Já nos meses de menor poluição por O_3 (mar, abr, mai), conseguimos identificar uma distribuição de chuvas consideráveis nos meses de março e abril, período chuvoso no semiárido que é o local de foco.

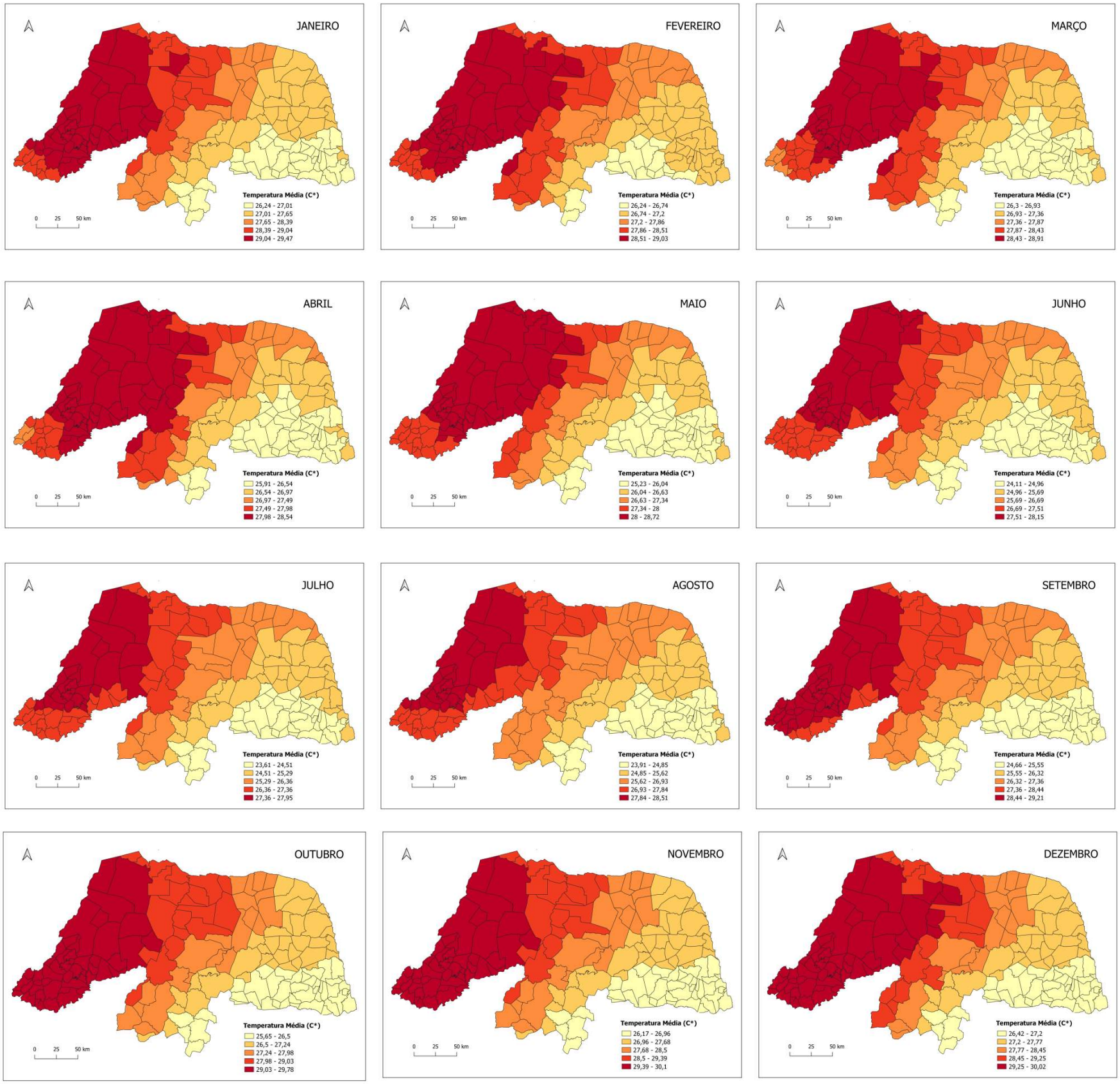
Contudo, os meses de maiores precipitações (jun, jul) não são necessariamente os meses de menor concentração de O_3, já que nesses meses, as precipitações estão concentradas no litoral, e ausentes nos pontos de foco. Fato que explica o porquê das maiores concentrações de ozônio não se apresentarem no verão e as menores no inverno, assim, sofrendo alteração pela distribuição das chuvas, que na área de estudo é a principal variável que influencia a sazonalidade.

3.3 Temperatura

Para mais, os dados de temperatura mostraram uma média mínima de 23, 61 °C, obtida em julho, e uma média máxima de 30,10 °C em novembro, revelando uma amplitude média baixa, de apenas 6,49 °C, indicando um clima quente o ano todo para todas as regiões do estado.

Ademais, a cartografia também revelou que o balanço de temperatura no Rio Grande do Norte se mantém constante o ano todo, com poucas alterações. Onde o interior do estado, equivalente à região Oeste, sempre possui as maiores temperaturas, que vai de forma gradual amenizando ao aproximar-se do Leste, encontrando as menores temperaturas sempre no sul do Agreste e do Litoral-sul. Indicando que quanto mais a Oeste ao Norte, maior a temperatura (Figura 4), havendo aqui a influência da umidade do mar e das ondas de leste, impulsionadas pelos ventos alísios, sobre o clima da costa nordestina.

Figura 4: Temperatura média mensal (°C)



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Como dito, a amplitude térmica é baixa e tem sua variação anual influenciada pela posição da ZCIT e dos regimes de chuvas. Tendo seus meses mais frios em junho, julho e agosto, coincidente com os altos níveis de chuvas concentradas no litoral, e os mais quentes no período da primavera e verão (Tabela 3).

Tabela 3: Médias mensais de temperatura (°C) ao longo do ano.

MESES	MÉDIA MÍNIMA (°C)	MÉDIA MÁXIMA (°C)
JANEIRO	26,24	29,47
FEVEREIRO	26,24	29,03
MARÇO	26,30	28,91
ABRIL	25,91	28,54
MAIO	25,23	28,72
JUNHO	24,11	28,16
JULHO	23,61	27,95
AGOSTO	23,91	28,51
SETEMBRO	24,66	29,21
OUTUBRO	25,65	29,78
NOVEMBRO	26,17	30,10
DEZEMBRO	26,42	30,02

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Através das descobertas sobre o ozônio, sabe-se que o aumento da radiação solar provoca o aumento das reações químicas na atmosfera, que tem como consequência o aumento do O_3. Em contrapartida, nem sempre o aumento da temperatura está ligado ao aumento do poluente, como evidenciado em análises.

E apesar da temperatura elevar-se levemente no fim do ano, condizendo com uma elevação do ozônio no segundo semestre, não se consegue fazer uma associação tão expressiva da influência dessa variável como da anterior, haja vista a baixa amplitude térmica (estando entre 23,60 °C a 30 °C em valores médios) que mantém o estado, em todas as regiões, quente o ano inteiro.

Não se evidencia também, ao olhar nessa escala, a influência da configuração geográfica de temperatura (onde a região mais quente é o Oeste, com temperaturas gradualmente decrescentes ao se aproximar do Leste), no padrão do poluente. Pois, esse

padrão não parece definir as concentrações de O_3, que se concentra no Centro e Norte sem colocar o Oeste em evidência (Figura 2). Uma explicação pode ser a maior ocorrência de chuvas nessa região do que nos locais de foco de ozônio.

Além disso, de acordo com Lacava (2000), meses mais quentes podem apresentar uma diminuição do O_3 por aumentar a nebulosidade, que acaba por diminuir a incidência de radiação. Essa pode ser uma explicação do porquê os índices de maior concentração de O_3 não se apresentar nos meses mais quentes (Tabela 1 e 3).

3.4 Velocidade do Vento

Por fim, trabalhou-se com os dados de médias mensais de velocidade do vento de cada município do estado, processados a partir de médias diárias calculadas via satélite, a fim de identificar a influência dessa variável na dispersão dos poluentes no estado.

Haja vista, que a velocidade do vento aparece na bibliografia como uma das variáveis mais importantes para a dispersão dos poluentes, pois as massas de ar (com velocidade acima de 1,5 m/s) são capazes de transportar poluentes, influenciando diretamente em suas concentrações (LACAVA et al., 2000).

Com isso, conhecer a velocidade dos ventos e sua direção podem servir de grande auxílio para identificar as fontes emissoras de poluentes e o seu grau de dispersão. Podemos evidenciar isso em estudos como os já citados na introdução, por exemplo. Para a identificação das fontes precursoras de ozônio em Sorocaba - SP (AUTUNES; AGUILAR; CAMARGO, 2018), utilizou-se de dados de direção dos ventos para definir a influência de centros industriais e área de queimadas em ocasiões que o poluente ultrapassou o padrão de qualidade do ar.

Contudo, esta análise tem como limitação a ausência de dados de direção do vento, impossibilitada devido à escala considerada neste estudo. Todavia, os dados de velocidade do vento, ainda assim, demonstram a capacidade de dispersão do O_3, demonstrando a influência dessa variável climática. Em estudo sobre a episódios prolongados com altas concentrações de ozônio sobre a região metropolitana de São Paulo (CARVALHO et al., 2012), em diversas vezes, a velocidade do vento e as concentrações de ozônio tiveram uma relação inversamente proporcional.

Obteve-se, portanto, os resultados demonstrados na Figura 5 e Tabela 4. O que se observa é uma maior velocidade do vento no centro potiguar e na fachada norte do estado ao longo do ano, com poucas alterações (Figura 5). A variação está entre 2,87 m/s a 7,85 m/s, em termos de média, onde o segundo semestre do ano aparece com ventos mais fortes do que o primeiro, com máximas entre julho a outubro, no período de inverno e início da primavera (Tabela 4).

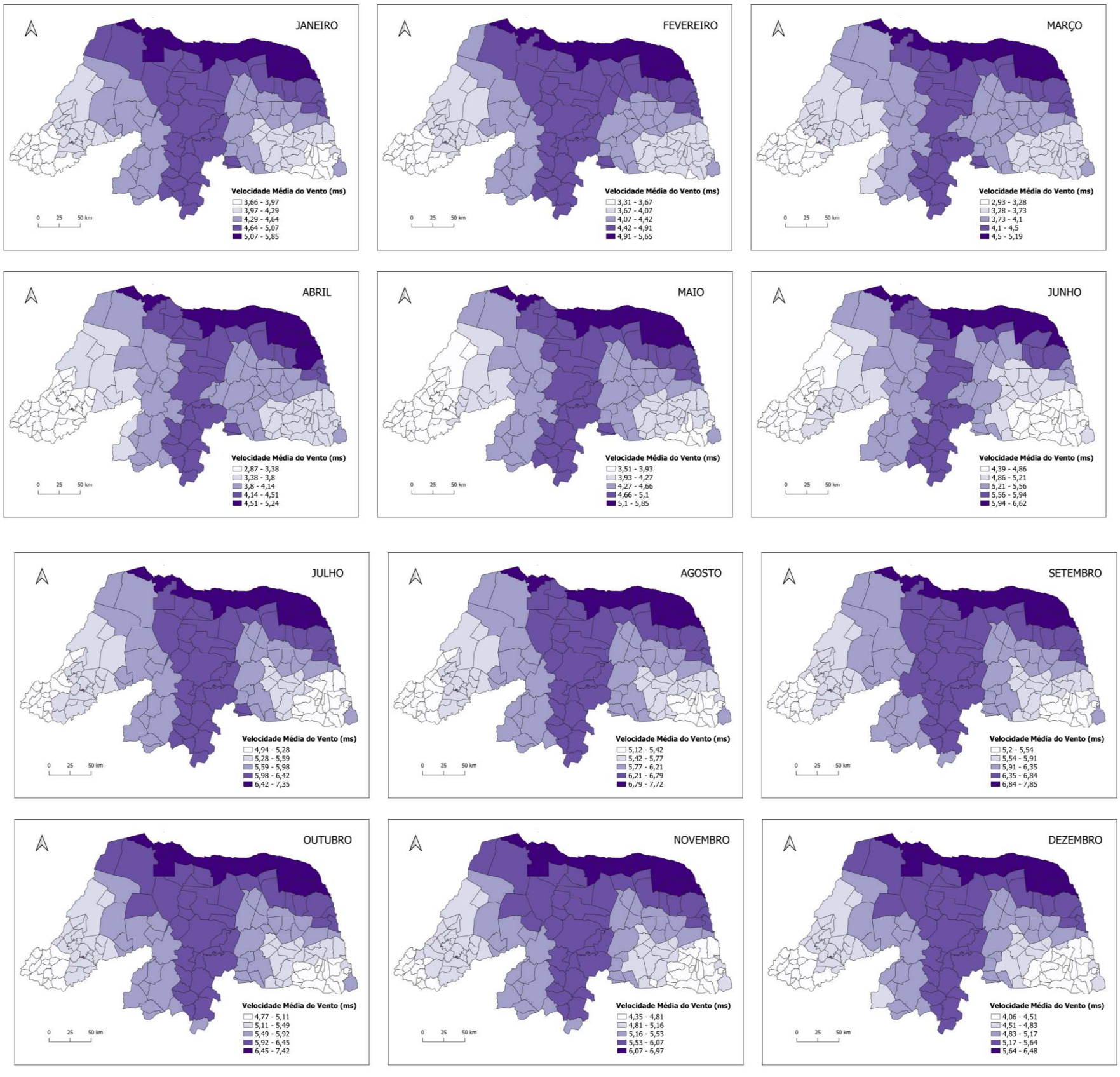
Tabela 4: Médias mensais máximas e mínimas da velocidade do vento (m/s).

MESES	MÉDIA MÍNIMA (m/s)	MÉDIA MÁXIMA (m/s)
JANEIRO	3,66	5,85
FEVEREIRO	3,31	5,65
MARÇO	2,93	5,19
ABRIL	2,87	5,24
MAIO	3,51	5,85
JUNHO	4,39	6,62
JULHO	4,94	7,35
AGOSTO	5,12	7,72
SETEMBRO	5,20	7,85
OUTUBRO	4,77	7,72
NOVEMBRO	4,35	6,97
DEZEMBRO	4,06	6,48

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Esses locais de maior velocidade do vento correspondem aos focos do poluente outrora identificados (Figura 2), indo em confronto ao que se esperava, levando a entender que a influência dessa variável seja mais bem observada em escalas geográficas e de tempo menores, como já evidenciado em outras pesquisas.

Figura 5: Velocidade média mensal dos ventos (m/s).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Supõe-se que a grande escala e as médias arredondadas utilizadas tenham dificultado a análise, visto que, esses fenômenos da ação das variáveis sobre os poluentes são mais observáveis em estala local ou regional, em escalas de tempo menores. Como no estudo de outrora citados, em que a escala de estudo estava entre município ou região, e a análise dos dados de vento foram feitas ao longo de um dia, como o estudo em Lamarão do Passé – BA (ALVES; ALVES, 2019), com dados coletados a cada 15 minutos. Ora, os dados coletados neste estudo referem-se a médias diárias em 16 anos de coletas, transformados em médias mensais.

Entretanto, por se tratar de uma análise exploratória, ainda inicial sobre a temática, abordada de forma estadual, como não encontrado nas pesquisas atualmente, revelou dados interessantes que visam despertar o interesse pelo aprofundamento no assunto. Nesse caso, a precipitação parece exercer maior influência sobre as concentrações de ozônio no estado do que as demais variáveis, como já se esperava no início da pesquisa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados nesta pesquisa, foi evidenciado que, apesar do Clima não ser o determinante da má qualidade do ar, ele é um condicionante. Verificando a influência dos regimes de chuva na concentração de ozônio no estado do Rio Grande do Norte. Bem como a relação dos locais de foco com as regiões de baixa precipitação, como o Centro Potiguar e a faixa Norte. No entanto, não foi possível explicar todos os padrões encontrados, além de não se observar tantas conexões com as demais variáveis.

Apesar dos desafios encontrados na análise, por se tratar de uma pesquisa em escala estadual não encontrada na pesquisa bibliográfica, conseguiu-se atingir o objetivo de explorar a temática e encontrar os resultados que podem ser o pontapé para pesquisas mais aprofundadas e precisas. Que possam servir para analisar a situação dos municípios de clima semiárido, com maior tendência a ter o ar mais poluído.

Por fim, conseguir utilizar essas informações para encontrar medidas de melhorar a qualidade do ar e de implementar estratégias para diminuir as emissões de COVs e melhorar o clima local. Utilizando algumas medidas, como evitar os cânions urbanos, que alteram a

direção dos ventos e a temperatura, e implementar e conservar áreas verdes, que contribuem na qualidade do ar, pela capacidade filtradora da vegetação.

REFERÊNCIAS

ALVES, L.S; ALVES, L.C.S. Formação e concentração do Ozônio troposférico no município de Lamarão do Passé – Ba: estudo das transformações de NOx e os possíveis impactos a saúde humana. **Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia**, Salvador, Nº 2447-0740, pg. 30-35, abril, 2019.

ALTUNES, M.L.P; AGUILAR, A.F; CAMARGO, S.R.G. Identificação das Fontes Precursoras de Ozônio na Troposfera de Sorocaba (S.P.). **REA – Revista de estudos ambientais**. v.10, n. 1, p. 33-39, 2008.

AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Tradução de Maria Juraci Zani dos Santos. São Paulo: Didel, 1986.

BRANCO, S. M; MURGEL, E. **Poluição do Ar**. São Paulo: Moderna, 2004.

BERRISFORD, P., KÅLLBERG, P., KOBAYASHI, S., DEE, D., UPPALA, S., SIMMONS, A.J., POLI, P., SATO, H. Atmospheric conservation properties in ERA-Interim. **Q. J. R. Meteorol. Soc**. 137, 1381–1399,2011.

BERTAZOLLI, A.L; BELLINI, F.L; GALLO, G.I. **Estudo da Viabilidade do biomonitoramento do Ozônio Troposférico**. 2009. 84 f. Monografia para obtenção de título de especialista em Gestão Ambiental – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

CASTELHANO, F.J. **O Clima e as Cidades**. Curitiba: Editora Intersaberes, 2020.

CASTELHANO, F.J.; PEDROSO, A.C.N.; COBELO, I.; BORGE, R.; ROIG, H.L.; ADAMS, M.; AMINI, H.; KOUTRAKIS, P.; REQUIA, W.J. The impact of long-term weather changes on air quality in Brazil. **Atmos. Environ**. 283, 119182,2022.

CARVALHO, V.S.B.; FREITAS, E.D.; MAZZOLI, C.R., ANDRADE, M.F. Avaliação da Influência de Condições Meteorológicas n Ocorrência e Manutenção de um Episódio Prolongado com Altas Concentrações de Ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.27, n.4, 463 - 474, 2012.

COBELO, I.; CASTELHANO, F.J.; BORGE, R.; ROIG, H.L.; ADAMS, M.; AMINI, H.; KOUTRAKIS, P.; REQUIA, W.J. The impact of wildfires on air pollution and health across land use categories in Brazil over a 16-year period. **Environ. Res**. 224, 115522.2023

COUTO, E.R. **Transformações de SO2 e NO2 na atmosfera da área de influência do Polo Industrial de Camaçari**. 2011. 273 f. Tese (Doutorado em Quimica) Universidade Federal da Bahia, Bahia. 2011

DEE, D.P., UPPALA, S.M., SIMMONS, A.J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., ANDRAE, U., BALMASEDA, M.A., BALSAMO, G., BAUER, P., BECHTOLD, P., BELJAARS, A.C.M., VAN DE BERG, L., BIDLOT, J., BORMANN, N., DELSOL, C., DRAGANI, R., FUENTES, M., GEER, A.J., HAIMBERGER, L., HEALY, S.B., HERSBACH, H., HOLM, ´ E.V., ISAKSEN, L., KÅLLBERG, P., KOHLER, ¨ M., MATRICARDI, M., MCNALLY, A.P., MONGE-SANZ, B.M., MORCRETTE, J.-J., PARK, B.-K., PEUBEY, C., DE ROSNAY, P., TAVOLATO, C., TH´EPAUT, J.-N., VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Q. J. R. Meteorol. Soc**. 137, 553–597.2011.

DERISIO, J.C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

FREITAS, L.L. Ozônio na Atmosfera do Campus da UFAM em Manaus. **Programa Institucional de Inicial Científica**. Amazonas, 2012.

GALBALLY, I.E., SCHULTZ, M.G., BUCHMANN, B. **Guidelines for Continuous Measurements of Ozone in the Troposphere.**Global Atmosphere Watch. World Meteorological Organization. 2013.

INNESS, A.; ADES, M.; AGUSTI-PANAREDA, A.; BARRE, J.; BENEDICTOW, A.; BLECHSCHMIDT, A.- M.; DOMINGUEZ, J.J.; ENGELEN, R.; ESKES, H.; FLEMMING, J.; HUIJNEN, V.; JONES, L.; KIPLING, Z.; MASSART, S.; PARRINGTON, M.; PEUCH, V.-H.; RAZINGER, M.; REMY, S.; SCHULZ, M.; SUTTIE, M. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. **Atmos. Chem. Phys**. 19. 2019

LUCENA, R.L; JÚNIOR, J.B.C; STEINK, E.T. Comportamento Hidroclimatológico do Estado do Rio Grande do Norte e do Município de Caicó. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, 485-496, 2018.

LACAVA, C.I.V; MARAMOTO, C.A; LOPES, C.F.F. **Estudo do comportamento do ozônio na região metropolitana de São Paulo**. São Paulo: CETESB,2000.

NEVES, N.M.S. **Formação e dispersão de ozônio na região do recôncavo baiano**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Quimica) Universidade Federal da Bahia, Bahia.2009.

PIMENTA, M.A. **Ozônio troposférico – os efeitos na saúde e no meio ambiente e diretrizes para a Região de Belo Horizonte**. 2010. 83 f. Monografia (Especialização em Engenharia Sanitária e Meio Ambiente) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010

REQUIA, W.J., CASTELHANO, F.J. Economic and racial disparities of the weather impact on air quality in Brazil. **Scientific Reports.** V. 13. E6374. 2023

SOUZA et al. Impacto de Fatores Meteorológicos sobre as Concentrações de Ozônio Modelados por Análise de Séries Temporais e Métodos Estatísticos Multivariados. **HOLOS**, vol. 5, 2017, pp. 2-16, 2017.