



**POLUIÇÃO DO AR E CLIMA:
PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O AGLOMERADO URBANO DE CURITIBA,
PARANÁ**

**AIR POLLUTION AND CLIMATE:
FUTURE PERSPECTIVES FOR CURITIBA'S URBAN CORE, PARANÁ**

**CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y CLIMA:
PERSPECTIVAS FUTURAS PARA EL NÚCLEO URBANO DE CURITIBA, PARANÁ**

DOI 10.33360/RGN.2318-2695.2019.i3.p.06-24

Francisco Jablinski Castelhana

Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO)
da Universidade Federal de Sergipe
E-mail: ficastelhana@gmail.com

Francisco de Assis Mendonça

Professor Titular do Departamento de Geografia Universidade Federal do Paraná (UFPR)
E-mail: chico@ufpr.br

RESUMO:

O presente trabalho tem como objetivo analisar dados históricos de clima e poluição do ar no aglomerado urbano de Curitiba, traçando tendências e procurando elucidar cenários futuros da qualidade do ar na região com base nas suas relações com a variabilidade climática local. Foram utilizados dados da estação meteorológica automática do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) em Curitiba e de cinco estações de monitoramento da qualidade do ar do aglomerado urbano de Curitiba, uma área que conta com cerca de 3.256.463 habitantes (IBGE, 2018) dispersos em onze municípios. A relação entre as variáveis climáticas e a variação de poluentes na região foi descrita estatisticamente revelando que ozônio troposférico e o material particulado (PTS) são os poluentes com mais fortes relações com o clima. Este estudo analisará também, tendências climáticas e dos poluentes para a cidade, buscando a elaboração de cenários para estes poluentes com base em suas relações com as variáveis meteorológicas. Os resultados apontam grande possibilidade de crescimento para o ozônio troposférico, tendo em vista os cenários climáticos desenhados, já para o PTS, os cenários climáticos indicam também uma grande possibilidade de aumento de dias com alta concentração deste poluente.

Palavras-chave: Poluição do Ar; Curitiba; Variabilidade Climática; Cenários Futuros.

ABSTRACT:

The current research aims to analyze historical data of climate and air pollution in Curitiba's Urban Core, projecting trends and purposing future scenarios for the air quality in the region, based on its relationship with the local climate variability. Data from the automatic meteorological station from the Parana's Meteorological System (SIMEPAR) at Curitiba were collected together with air quality data from five monitoring stations across Curitiba's urban core. The area counts with 3.256.463 inhabitants (IBGE, 2018) divided in eleven municipalities. The relationship between the climate variables and the air pollutants on the study area was statistically described. The Total Suspended Particles (TSP) and the Tropospheric Ozon are te pollutants with the highest level of relation with the climate variability. This study will analyze the climate and air pollution trends looking for the elaboration of scenarios for those pollutants, based on their relations with the meteorological variables. The results reveals great possibilities for an increase on the ozon levels, based on the climate variability trends. For the TSP, the climate scenarios indicate a scenario of increase on the days with high concentrations of this pollutant.

Keywords: Air Pollution; Climate Variability; Curitiba; Future Scenarios.

RESUMEN:

Este artículo tiene como objetivo analizar los datos históricos del clima y la contaminación del aire en el área urbana de Curitiba, rastreando tendencias y tratando de dilucidar escenarios futuros de calidad del aire en la región en función de su relación con la variabilidad climática local. Los datos de la estación meteorológica automática de SIMEPAR en Curitiba y de cinco estaciones de monitoreo de la calidad del aire se utilizaron en el área urbana de Curitiba, un área con aproximadamente 3.256.463 habitantes (IBGE, 2018) dispersos en once municipios. La relación entre las variables climáticas y la variación de los contaminantes en la región estudiada fue estadísticamente descrita al dar fe de que las partículas suspendidas totales (PTS) y el ozono troposférico son los contaminantes con el mayor grado de relación con la variabilidad climática. Por lo tanto, este estudio analizará el clima y las tendencias de los contaminantes para la ciudad, buscando elaborar escenarios para estos contaminantes en función de su relación con las variables meteorológicas. Los resultados indican una gran posibilidad de crecimiento para el ozono troposférico, considerando los escenarios climáticos diseñados. Para el PTS, los escenarios climáticos también indican una gran posibilidad de aumentar los días con alta concentración de este contaminante.

Palabras clave: Contaminación del Aire; Variabilidad Climática; Curitiba; Escenarios Futuros.

1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento que os níveis de poluição do ar mantêm uma relação próxima com distintas variáveis. Segundo McCormac (1971), é possível estimar a intensidade da poluição do ar com base em dois fatores principais, o índice de emissão e o índice de dispersão. O índice de emissão se relaciona diretamente com variáveis ligadas à produção capitalista do espaço urbano tais como, mobilidade urbana, planejamento urbano, economia, política entre outras, revelando-se como um fenômeno de complexa análise.

A literatura tem apontado aumentos nos níveis de poluição a partir da análise destas distintas variáveis que contribuem para os níveis de emissão indicando que o aumento no nível de poluição está ligado de forma mais determinante aos índices de emissão em relação aos de dispersão.

Jimenez e Torrecilla (2007) apontam que diferentes níveis de SO₂ em Madrid na Espanha correspondem diretamente a diferentes tipos de aquecedores utilizados pela cidade. De acordo com os autores, nas áreas de mais baixo nível social, os aquecedores são mais baratos, movidos a combustíveis de pior qualidade e influenciando diretamente nos níveis de poluição da cidade e revelando uma relação entre segregação socioespacial e poluição do ar na capital espanhola.

Czerneck *et al.* (2017) atestaram a influência de queima de madeira e lenha doméstica nas regiões de baixa renda da Polônia, revelando novamente uma relação entre condições sociais e poluição do ar.

Em estudo realizado na cidade de São Paulo pela CETESB (2015) revelou-se que entre 40% e 60% do material particulado da cidade provém de veículos, relacionando as deficiências no transporte público e ausência de outros modais, aos altos níveis de poluição enfrentados pela cidade.



Kumar *et al.* (2016) também identificaram percentuais nas emissões a partir de contribuições das chamadas fontes pequenas tais como pizzarias e churrascarias e outros serviços alimentares movidos a queima de carvão e lenha. Os autores apontaram a ausência de legislação e fiscalização para estas causas como um dos gatilhos para este problema, relacionando hábitos culturais com níveis de poluição.

A relação entre o clima e a poluição, por outro lado, situa-se como outro campo já bem estudado pela academia. O clima representa uma variável importante na compreensão dos níveis de qualidade do ar mesmo sendo considerado como uma parte do índice de dispersão.

Derisio (2012) aponta a velocidade do vento, direção do vento, temperatura e precipitação como aqueles fatores com maior relação nos níveis de poluição.

Segundo os últimos relatórios sobre o cenário futuros do Clima do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), sabe-se que a dinâmica climática vem passando por profundas modificações, afetando uma série de fatores ligados ao clima, entre eles, os níveis de qualidade do ar.

Conhecendo a relação entre as variáveis climáticas, como parte dos índices de dispersão na qualidade do ar a nível local, e também os cenários de mudanças climáticas desenhados, este artigo visa discutir os cenários futuros para os níveis de poluição do ar para o aglomerado urbano de Curitiba, capital do Paraná, sul do Brasil, com base nos cenários climáticos prospectados para a região.

A área de estudo conta com mais de 3 milhões de habitantes, dispersos em onze municípios diferentes. Curitiba é conhecida por seu planejamento urbano, todavia, a cidade enfrenta sérios problemas no âmbito da qualidade do ar (CASTELHANO, 2019).

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar a relação entre os níveis de poluentes na cidade de Curitiba com algumas variáveis meteorológicas para então, com base nas tendências futuras de ditas variáveis meteorológicas, prospectar cenários futuros para a poluição do ar em dita cidade.

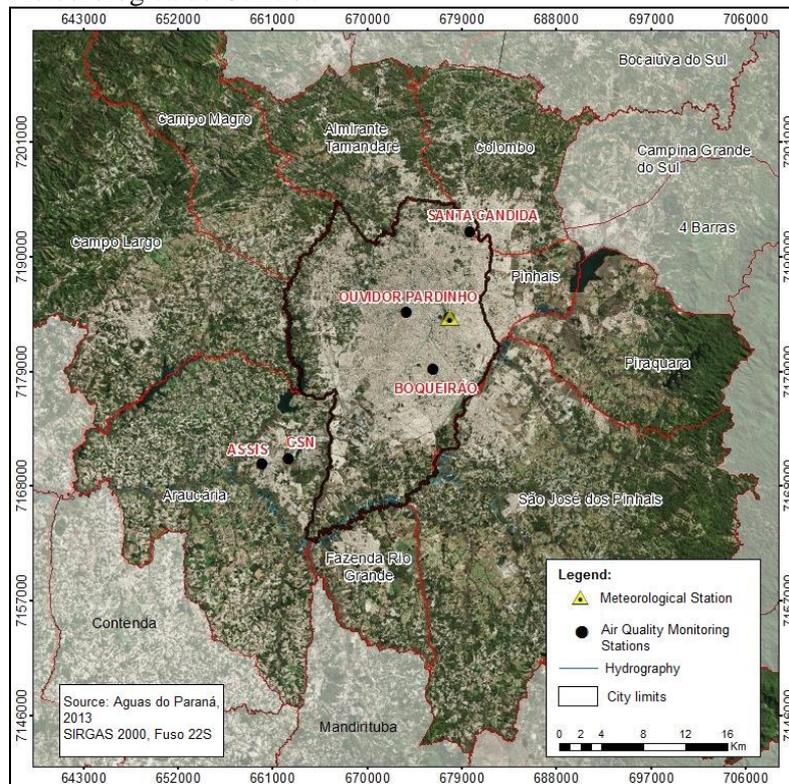
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o cumprimento do objetivo supracitado, foram coletados dados horários dos poluentes Ozônio Troposférico (O₃), Material Particulado (PTS) e Dióxido de Enxofre (SO₂) para cinco estações de monitoramento da qualidade do ar no Aglomerado Urbano de Curitiba. Os dados coletados correspondem ao período de 2005 a 2014, totalizando dez anos de dados.



Junto aos dados de poluição, foram coletados dados meteorológicos de temperatura (máximas, mínima e máxima) e precipitação da estação meteorológica do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). A localização das cinco estações de qualidade do ar, bem como da estação meteorológica podem ser visualizadas pela figura 1. Os dados coletados foram tratados estaticamente junto ao software Excel e posteriormente com o software R.

Figura 1: Localização das Estações de Qualidade do Ar e Meteorológica de Curitiba



Fonte: Instituto Ambiental do Paraná (2019) e Simepar (2019).

Elaboração: Castelhana (2019)

Em um primeiro momento, os dados climáticos foram correlacionados com as séries de poluição. Para compreender-se a relação entre os níveis de temperatura e poluição optou-se pela criação e análise de gráficos de dispersão envolvendo as variáveis supracitadas em escala horária, através do software R com o auxílio do pacote de dados car (FOX; WEISBERG, 2011), desenvolvido para auxiliar na geração de gráficos e visualização de séries e modelos temporais.

Junto a tais plotagens foram geradas linhas suavizadas unidimensionais, apontadas por Lima (2001) como uma ferramenta estatística capaz de descrever a tendência de uma variável Y em função de apenas uma variável X, sendo esta uma ferramenta própria para o estudo da dependência de duas variáveis.



O método suavizador utilizado foi o Modelo Aditivo Generalizado ou MAG (GAM em inglês), apontado por Conceição *et al.*, (2001) como:

[...] uma extensão do modelo linear generalizado (MLG) [...]denotando uma função não paramétrica estimada através de curvas de alisamento. [...] não é necessário assumir uma relação linear entre $g(\mu_i)$ e as variáveis explicativas, como no MLG. De fato, não é necessário nem mesmo conhecer previamente a forma dessa relação, mas é possível estimá-la a partir de um conjunto de dados. Essa função estimada ($j(x_{ij})$), também chamada de curva alisada, em muitas situações, nada mais é do que algum tipo de média dos valores Y_i na vizinhança de um dado valor x_i . A curva alisada permite então descrever a forma, e mesmo revelar possíveis não linearidades nas relações estudadas, uma vez que não apresenta a estrutura rígida de uma função paramétrica (CONCEIÇÃO *et al.*, 2001, p. 209).

A utilização de um modelo aditivo generalizado na análise de correlações como as aqui propostas substitui a utilização de coeficiente linear e é particularmente interessante, pois retrata detalhadamente a complexa relação não-linear entre as variáveis aqui apresentadas (PEARCE *et al.*, 2011).

Tal técnica estatística já foi muito utilizada para estudos envolvendo poluição atmosférica como visto em Dominici *et al.* (2002), Lima (2001), Tobias e Saez (2004), Peng *et al.* (2006) e mais recentemente e com mais detalhes por Belusic *et al.*, (2015).

A análise da relação entre chuva e poluentes pautou-se em outra análise. Para a análise referente à precipitação, o procedimento seguido foi de categorização dos tipos de chuva segundo proposta de Pinheiro (2016), e observação do comportamento dos poluentes para cada categoria.

A proposta de Pinheiro subdivide os tipos de chuva na região do Aglomerado Urbano de Curitiba (AUC) em cinco tipos de acordo com os valores registrados por dia. Assim têm-se chuvas ligeiras (0,1 a 2,5 mm), moderadas (entre 2,5 e 7,5 mm), intensa (7,5 e 15 mm), muito intensa (entre 15,0 mm e o valor do percentil 95%) e por fim, as extremas (acima do percentil 95%), além disto, ainda foi proposta uma sexta categoria para os dias sem chuva.

Contudo, para observar com maior clareza a afinidade entre as categorias de chuva e os níveis de poluentes optou-se por trabalhar com oito categorias listadas na tabela 1. A proposição de tais categorias se deu embasada por testes estatísticos e observações dos dados de poluentes mediante situações de chuva. Foram gerados *boxplots* para cada poluente em cada estação de coleta, indicando a flutuação dos valores de poluição sob cada categoria de chuva, possibilitando uma análise concisa do comportamento de cada poluente em relação à precipitação junto ao software R.

Tabela 1: Categorias de Chuvas Propostas

CATEGORIA	QUANTIDADE DIÁRIA DE CHUVA
Seco	0,0 mm
Categoria 1	0,1 mm até 2,5 mm
Categoria 2	2,6 mm até 5 mm
Categoria 3	5,1 mm até 7,5 mm
Categoria 4	7,6 mm até 10 mm
Categoria 5	10,1 mm até 12,5 mm
Categoria 6	12,6 mm até 15 mm
Categoria 7	>15,1 mm

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2016).

Elaboração: Castelhana (2019).

Com o detalhamento da relação entre variáveis climáticas e poluição, partiu-se para a análise da variabilidade climática de Curitiba. Neste ponto, o objetivo é de determinar quais as tendências observadas na variabilidade climática local para então compreendermos de que forma tais alterações poderão afetar os poluentes da cidade.

Para melhor interpretar e dar maior consistência estatística a esta análise buscou-se a série histórica mais longa disponível. Assim, para a análise de variabilidade climática histórica em Curitiba, foram coletados cinquenta e sete anos de dados meteorológicos diários (1961-2017) da estação oficial do INMET, alocada no centro politécnico junto a estação utilizada anteriormente pertencente ao SIMEPAR e apontada pelo mapa da figura 1.

Para avaliar a variabilidade climática de Curitiba, buscou-se realizar uma análise estatística com base nos vinte e sete índices de mudanças climáticas propostos por Peterson *et al.*, (2001) e recomendados pela Organização Mundial Meteorológica. Os índices utilizam-se de dados em escala diária de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação, sendo conhecidos como “Índices ETCCDI¹”.

Estes índices foram criados com o objetivo de facilitar a análise de alterações climáticas extremas a partir de dados em escala diária, suas análises em conjunto a testes estatísticos de tendência revelariam possíveis alterações ou variâncias nos climas em escala local. Foram selecionados apenas doze dentre os vinte e sete índices propostos pelo ETCCDI que de alguma forma podem vir a demonstrar relações com os poluentes analisados nesta pesquisa.

¹ Sigla para Expert Team on Climate Change Detection and Indices, parte do World Climate Research Programme, parte por sua vez da Organização Meteorológica Mundial e da ONU.



Dentre os analisados estão seis índices que trabalham diretamente com a variável temperatura. São eles: número de dias de verão (SU) que registra uma contagem anual de dias em que a temperatura máxima diária ultrapassou os 25 °C; número de noites tropicais (TR) que contabiliza anualmente os dias em que a temperatura mínima é superior a 20 °C; temperaturas máximas das máximas (TXX), que aponta o valor máximo da temperatura máxima por mês; temperaturas máximas mínimas (TXN), que registra o menor valor mensal dentre os registros de temperatura máxima; temperatura mínimas máximas (TNX) que registra o maior valor mensal dentre as temperaturas mínimas e as temperaturas mínimas da mínimas (TNN) que registram os menores valores mensais das temperaturas mínimas.

Os outros seis índices debruçam-se sobre os dados de chuva diária, são eles: chuva mensal máxima diária (RX1DAY) que registra o valor máximo de chuva diária por mês; índice simplificado de intensidade de chuva (SDII) que registra a quantidade de chuva dividida pelo número de dias com chuva por ano; dias com registro de chuva acima de 2,5 mm (RNNMM); dias secos contínuos (CDD), que registra o número máximo de dias seguidos sem chuva por ano; dias úmidos contínuos (CWD), que registram a contagem anual de dias consecutivos com registros de chuvas e por fim o total de precipitação anual (PRCPTOT).

A análise de tendência dos índices previamente gerados se deu através do cálculo de tendências de Mann e Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). Tal técnica aponta a existência ou não de uma tendência monotônica ao crescimento ou a queda nos valores analisados. O Teste de Mann Kendall se encaixa como um teste estatístico não paramétrico, portanto, ideal para analisar tendências de series históricas consideradas sem distribuições normais e sem a necessidade de independência entre os dados amostrais, tornando-o um dos testes de tendência mais utilizado nas análises de series históricas de dados climáticos (PINHEIRO, 2016; MOREIRA & NAGHETTINI, 2016), assim como, também amplamente utilizado em conjunto ao cálculo dos índices climáticos supracitados (RAZAVI *et al.*, 2016; KEGGENHOFF *et al.*, 2014).

A aplicação do teste de Mann Kendall se sucedeu através do pacote Kendall para R, e gera como resultados os valores “*p-value*” e “*tau*” que apontam a presença ou não de tendências monotônicas e o seu sentido (positivo ou negativo) respectivamente.

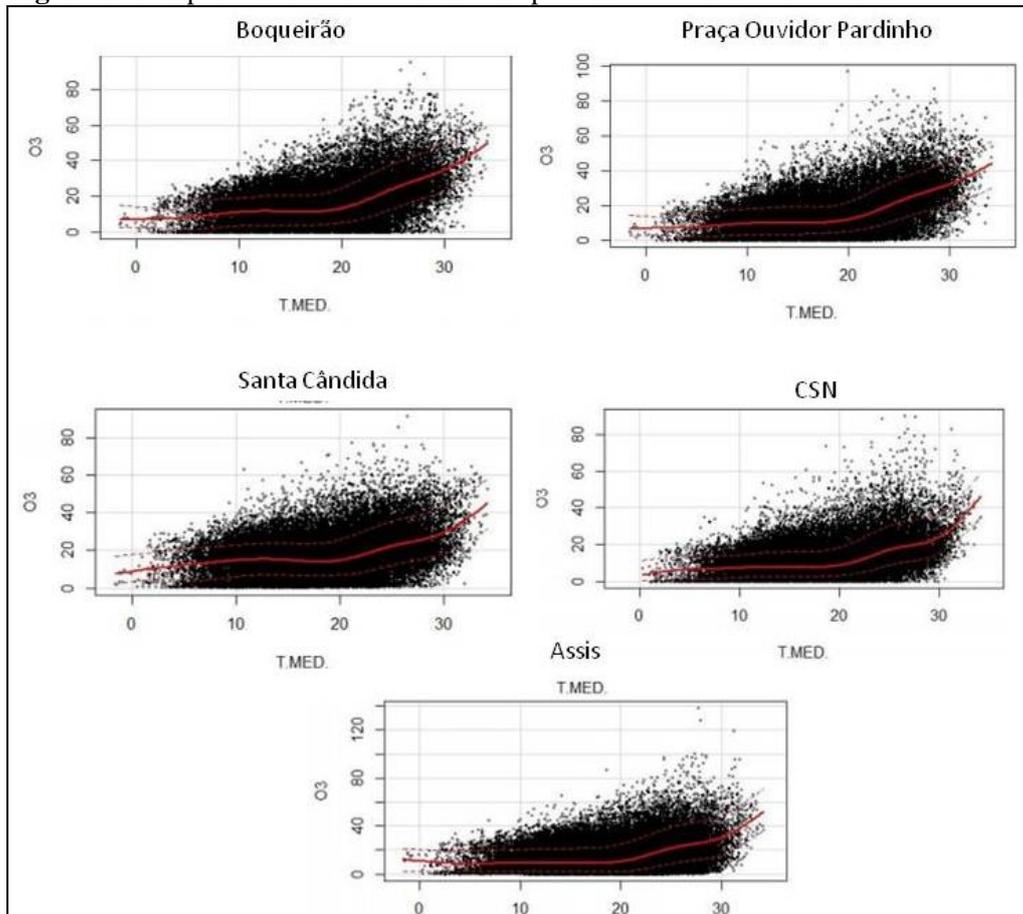
Considerou-se para o teste aplicado, o nível de significância de 95% que indica ou não a presença de tendências monotônicas. Considera-se como indicador de tendência os valores de *p-value* inferiores a 0,05. Já o valor de tau, se positivo, indica uma tendência ao crescimento, e quando negativo, aponta uma tendência ao decréscimo.

3 CLIMA E POLUIÇÃO DO AR EM CURITIBA

3.1 TEMPERATURA E POLUIÇÃO DO AR EM CURITIBA

As análises estatísticas revelaram que apenas o poluente ozônio troposférico apresenta algum tipo de relação com a variação de temperatura na cidade de Curitiba (Figura 2). Percebeu-se que a curva de dispersão se torna ascendente a partir de temperaturas superiores a 20°C. Após este limite, a relação entre os níveis do poluente e o aumento da temperatura torna-se praticamente linear, em todas as cinco estações analisadas.

Figura 2: Temperatura Média e Ozônio Troposférico – Curitiba/ 2005-2014



Fonte: IAP (2015) e SIMEPAR (2019)

Elaboração: Castelhana (2019)

Tais resultados já eram esperados por conta do processo particular de formação do ozônio a nível troposférico. O NO₂, segundo Baird (2002), é o responsável pela transformação química que gera o ozônio (O₃). Segundo o autor, o primeiro poluente tem como fonte principal a queima de combustíveis fósseis por veículos.

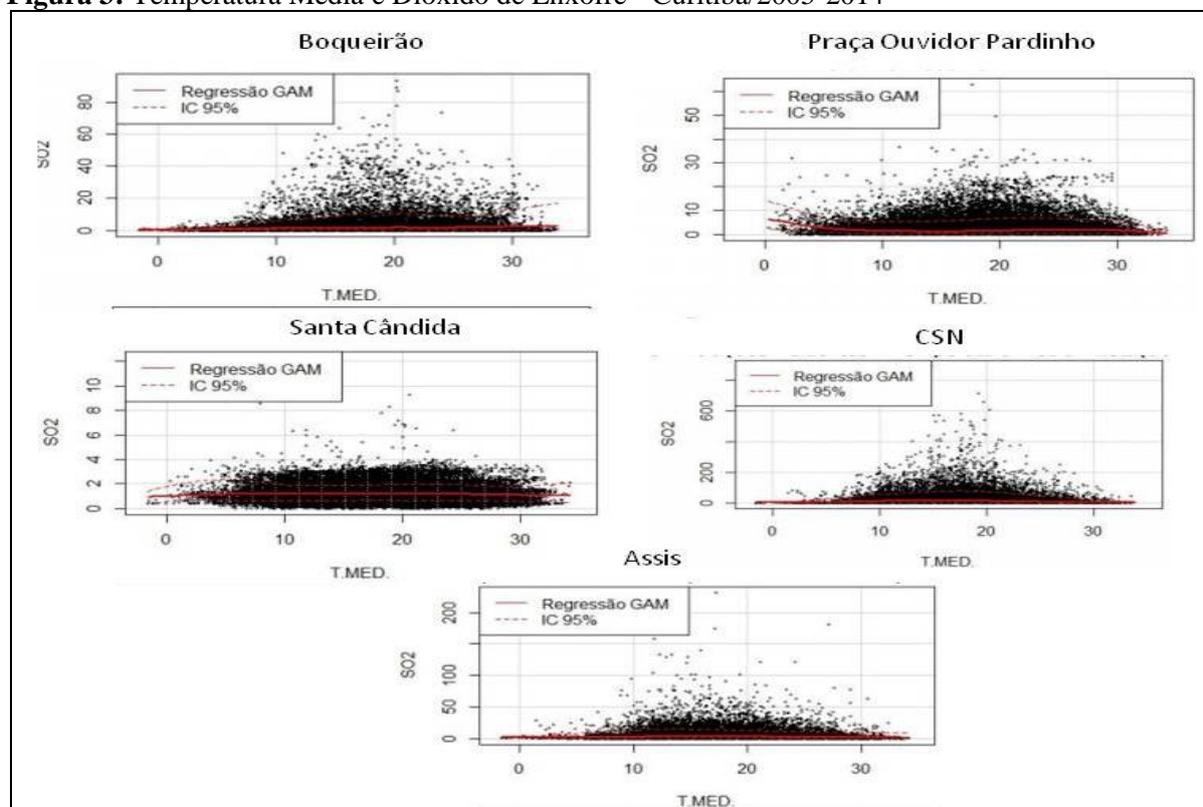


De acordo com Schirmer e Lisboa (2008) o NO_2 é altamente sensível à luz e radiação, sofrendo o processo de fotólise (quebra de sua composição química em decorrência da ação da radiação). Esse processo tem como resultado a dissociação da molécula de NO_2 em NO em um oxigênio atômico, que tem a possibilidade de reagir com o O_2 da atmosfera e com compostos orgânicos voláteis (VOC), formando o O_3 , outro poluente.

O material particulado e o dióxido de enxofre por outro lado, mostram-se com uma relação quase inexistente com a variação de temperatura, indo contra o apontado pela literatura, que indica o calor como uma forma de dispersão em decorrência da formação de correntes convectivas (MCCORMAC, 1971; DERÍSIO, 2012).

A figura 3 indica a relação encontrada entre os níveis de SO_2 nas cinco estações analisadas neste estudo com a variação de temperatura média para o mesmo período.

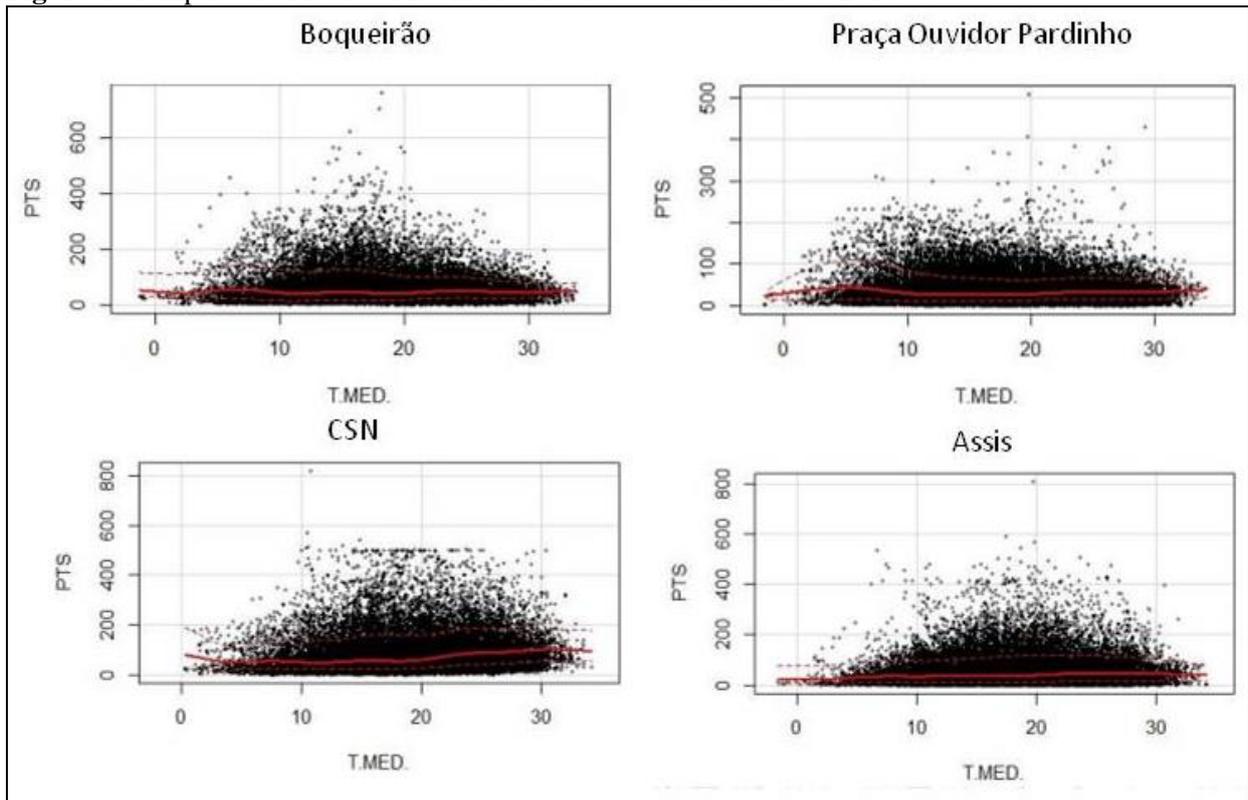
Figura 3: Temperatura Média e Dióxido de Enxofre - Curitiba/2005-2014



Fonte: IAP (2015) e SIMEPAR (2019)

Elaboração: Castelhana (2019)

A ausência de padrão observada em todas as estações e demonstradas tanto na figura 3 quanto na figura 4 revela uma fraca relação entre as variáveis aqui analisadas. No caso do PTS, a estação Santa Cândida apresentou diversas falhas ao longo do período analisado, de modo que se optou por suprimir os dados de dita estação para a presente análise.

Figura 4: Temperatura Média e Material Particulado - Curitiba/ 2005-2014

Fonte: IAP (2015) e SIMEPAR (2019)

Elaboração: Castelhana (2019)

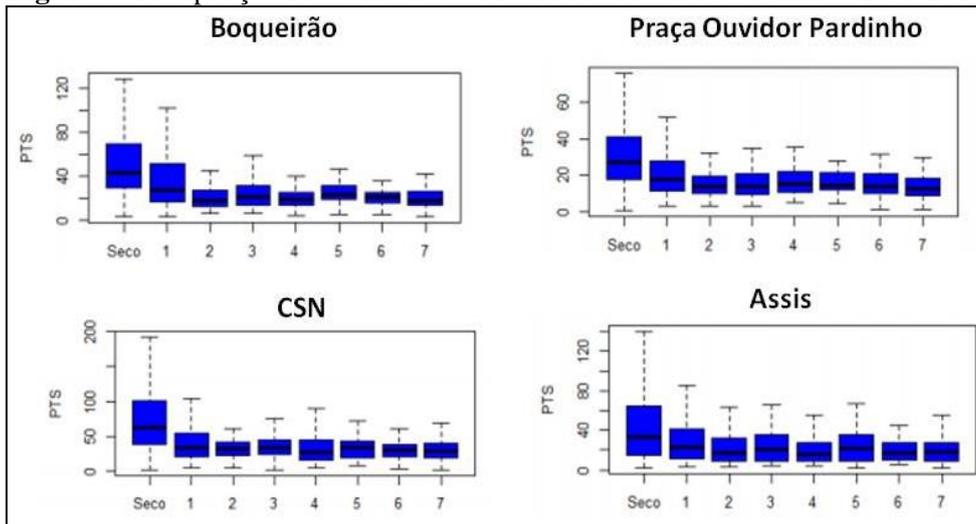
3.2 PRECIPITAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E POLUIÇÃO DO AR EM CURITIBA

Analisando a relação entre os níveis de chuva e os valores de poluição, percebe-se que, dentre os compostos analisados, o material particulado foi aquele que se mostrou com relações mais fortes ante as chuvas.

O poluente mostrou-se sempre com seus mais altos níveis ao longo dos dias em que não houve registros de chuvas. Dias com chuva de até 2,5 mm ainda registraram valores relativamente elevados em relação aos demais. Tal fato ocorreu em todas as estações analisadas e pode ser visualizado pela figura 5.



Figura 5: Precipitação Pluviométrica e Material Particulado - Curitiba/ 2005-2014

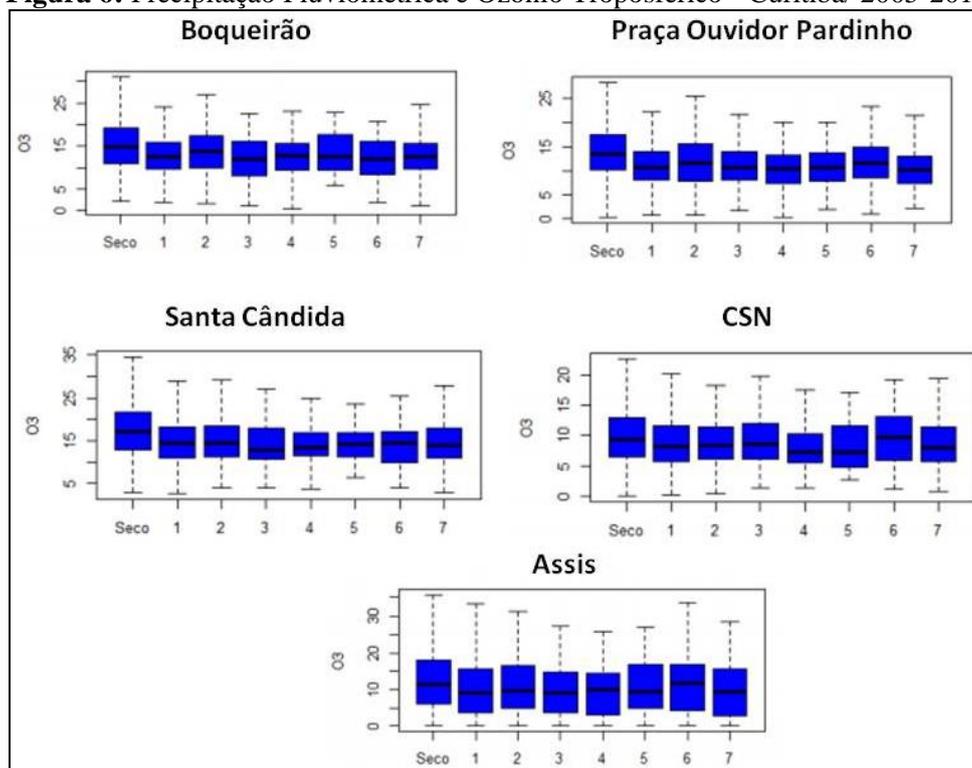


Fonte: IAP (2015) e SIMEPAR (2019)

Elaboração: Castelhana (2019)

No caso do ozônio troposférico, que havia demonstrado relações fortes com a temperatura, em momentos de chuva, sua variação não apresenta grandes alterações. Embora os maiores valores sejam registrados em momentos sem chuva, percebeu-se que a oscilação entre categorias de chuva foi pouca (Figura 6).

Figura 6: Precipitação Pluviométrica e Ozônio Troposférico - Curitiba/ 2005-2014

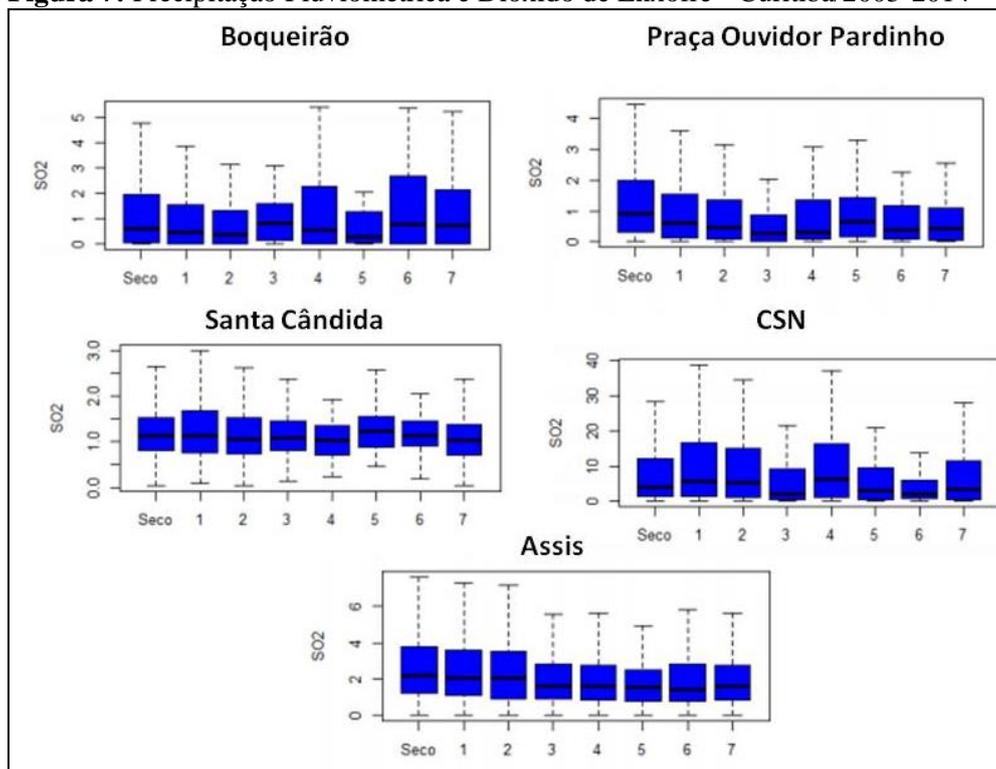


Fonte: IAP (2015) e SIMEPAR (2019)

Elaboração: Castelhana (2019)

Finalizando a análise entre precipitação e poluição, a figura 7 nos mostra a variação do dióxido de enxofre de acordo com os tipos de chuva. Este poluente foi o que apresentou as relações mais fracas. Os *boxplots* revelam que, apenas nas estações Assis e Praça Ouvidor Pardiniho os maiores valores do poluente foram registrados em momentos sem chuva. É possível notar que, em alguns casos, os maiores valores do poluente foram registrados em momentos com registros de chuvas nas categorias até 2.5mm e acima de 15mm. Conclui-se que o dióxido de enxofre ao longo do período coletado, apresenta relações muito fracas ou inexistentes com as oscilações climáticas de Curitiba.

Figura 7: Precipitação Pluviométrica e Dióxido de Enxofre - Curitiba/2005-2014



Fonte: IAP (2015) e SIMEPAR (2019)

Elaboração: Castelhana (2019)

4 VARIABILIDADE CLIMÁTICA E TENDÊNCIAS EM CURITIBA

A análise das séries históricas de dados climáticos, aliado à geração dos índices ETCCDI, utilizados nesta pesquisa, revelou algumas tendências e alterações no cenário climático de Curitiba dos anos 1960 até os dias atuais que podem impactar em possíveis alterações nos níveis de poluição do ar na cidade.

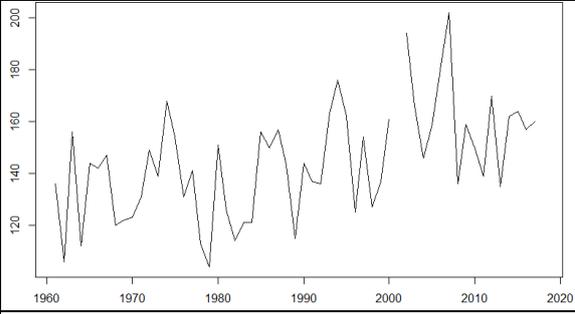
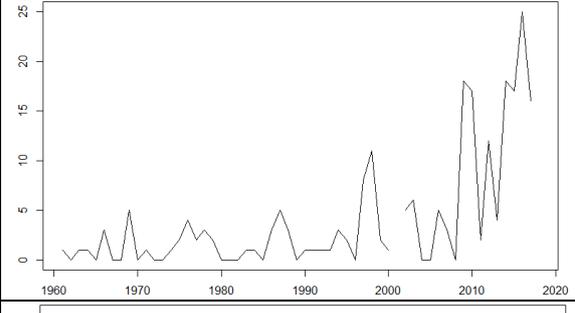
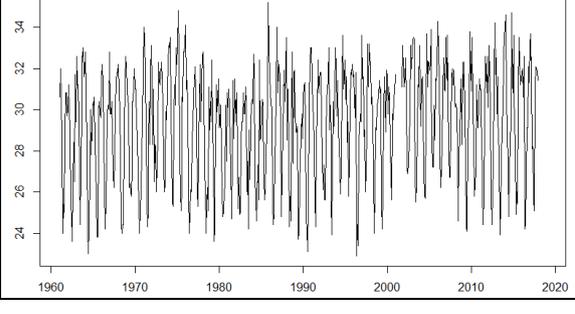
Os testes de Mann Kendall aplicados aos índices escolhidos revelaram tendências positivas em sua quase plenitude no âmbito dos índices relativos à temperatura. A tabela 2 apresenta os

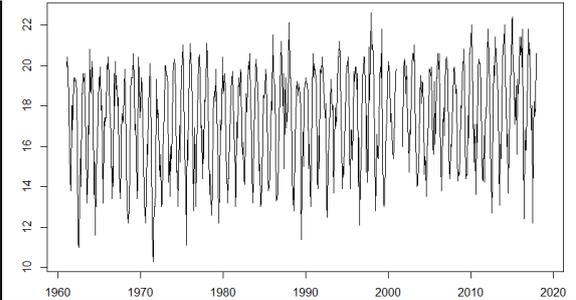
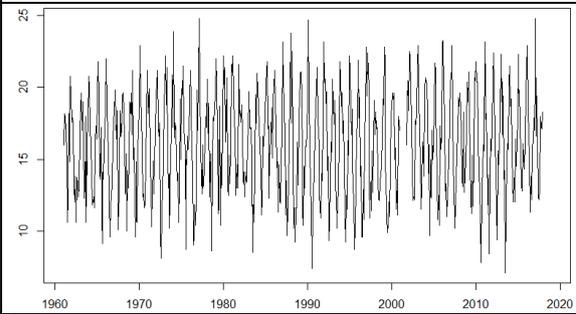
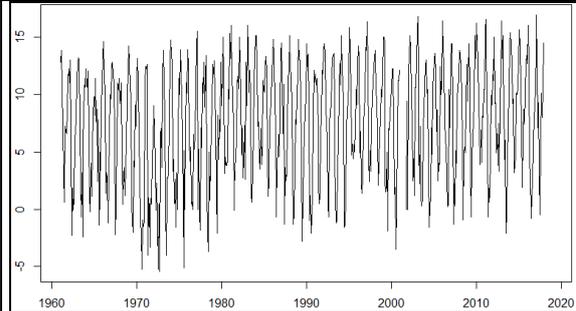


resultados deste teste estatístico sintetizado, trazendo o p-valor, tau, direção da tendência e a série temporal analisada. O único índice que abarcava a variável térmica sem tendências registrada foi o TXN (temperaturas mínimas das máximas).

Os valores indicam que a cidade de Curitiba tem apresentado aumentos significativos de temperatura. As temperaturas mínimas também apresentaram tendências positivas, tanto no índice que calcula as temperaturas mínimas mais baixas (TNN) quanto o que aponta as temperaturas mínimas mais elevadas (TNX). Estes índices, aliados às Temperaturas máximas das máximas (TXX) que também apresentaram tendências positivas, indicam um aumento gradual nas temperaturas de Curitiba nos últimos cinquenta e sete anos, sem necessariamente aumentar a amplitude térmica.

Tabela 2: Índices de Variabilidade Térmica e Tendências em Curitiba – 1961-2017

ÍNDICE ETCCDI	TAU	P-VALOR	TENDÊNCIA	SERIE TEMPORAL
SU	0,344	0,0001945	Ascendente	
TR	0,404	0,000035	Ascendente	
TXX	0,0962	0,00020266	Ascendente	

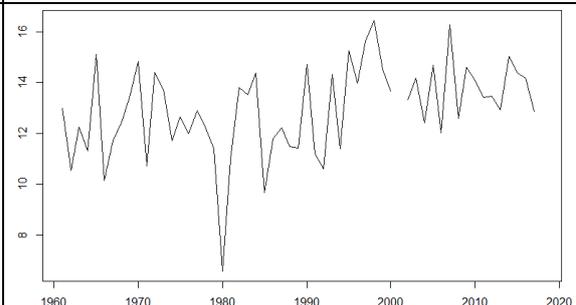
TNX	0,125	0,00000143	Ascendente	
TXN	0,036	0,16365	Ausente	
TNN	0,11	0,0000206	Ascendente	

Fonte: INMET (2019)

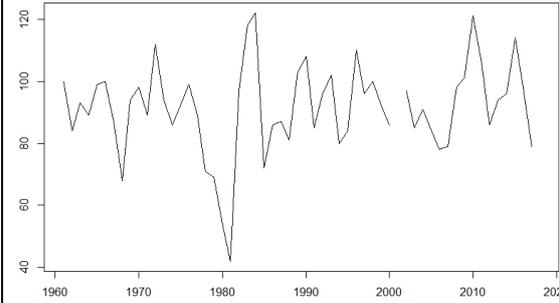
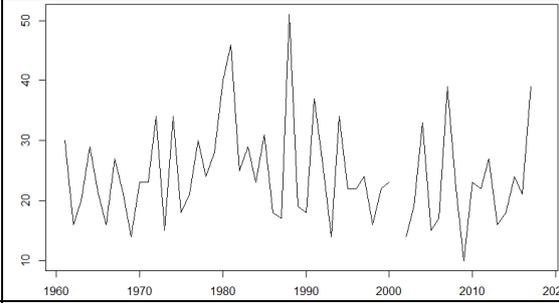
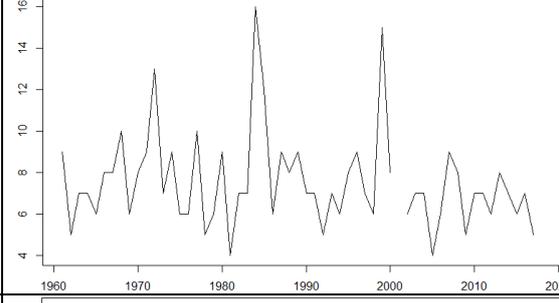
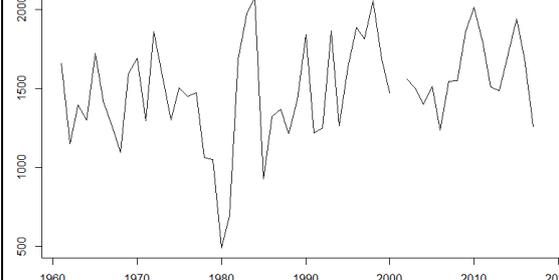
Elaboração: Castelhana (2019)

Os índices referentes à chuva demonstraram resultados peculiares. Não foram detectadas tendências nos índices que calculam dias contínuos secos ou com chuva, todavia, observou-se uma tendência ao aumento no total de chuva e também na intensidade da chuva. Isto pode indicar uma possível alteração na dinâmica de chuvas da cidade, em que o volume total será maior, todavia, o período de precipitação será menor. A tabela 3 revela os dados e tendências de cada índice de pluviometria calculado.

Tabela 3: Índices de Variabilidade de Precipitação e Tendências em Curitiba – 1961-2017

ÍNDICE ETCCDI	TAU	P-VALOR	TENDÊNCIA	SÉRIE TEMPORAL
SDII	0,242	0,0087401	Ascendente	



RNNMM	0,0472	0,61549	Ausente	
CDD	-0,0463	0,62512	Ausente	
CWD	-0,136	0,1664	Ausente	
PRCPTOT	0,191	0,038379	Ascendente	

Fonte: INMET (2019)

Elaboração: Castelhana (2019)

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos permitem-nos admitir que, dentre os três poluentes analisados nos pontos da cidade de Curitiba, apenas dois apresentaram relações significantes com a condição climática, o ozônio troposférico e o material particulado.

Os dados permitem-nos concluir que os poluentes apresentam dinâmicas distintas entre si, em decorrência de suas composições e processos de formação. Além disso, a localização das estações de monitoramento, em função de características geográficas diversas, como fluxo de

veículos, indústrias ou áreas verdes, apresenta impacto nos valores finais e dinâmicas temporais dos poluentes igualmente.

As relações observadas, todavia, mostraram-se semelhantes em todos os pontos de coleta, permitindo-nos aferir que o ozônio troposférico apresenta forte correlação direta com os níveis de temperatura, e que o material particulado se mostra com mais intensidade em dias sem registros de chuva.

A literatura aponta que a umidade relativa do ar e a precipitação são fatores climáticos chaves na determinação dos valores de poluição, todavia, tal fato depende do poluente analisado, conforme vimos.

Derisio (2012), Branco e Murgel (2004) e McCormac (1971) são exemplos de autores que apontam tanto a relação das chuvas quanto de temperaturas elevadas com a facilidade na dispersão de poluentes como um todo. Tal fato acabou por ser parcialmente comprovado, visto que, as variações na temperatura apresentaram relações diretas apenas como o ozônio, e relações estas envolvendo o aumento do poluente e não a sua diminuição.

No âmbito da variabilidade climática, observou-se que, ao longo do período estudado, cinquenta e sete anos, a cidade de Curitiba tem apresentado fortes tendências ao aumento de sua temperatura. Não foi o objetivo deste trabalho discutir as causas deste aumento, mas a ocorrência do mesmo foi estatisticamente comprovada.

Segundo os estudos apresentados, tal incremento pode agir diretamente nos níveis de ozônio troposférico da cidade. O poluente em questão foi relatado por Castelhana (2019b) como o único poluente da cidade com tendências estatísticas ao crescimento nos últimos dez anos.

O referido autor complementa que, o poluente NO_2 , um dos responsáveis pela formação do ozônio, tem apresentado tendências a queda, e que aumentos na temperatura da cidade poderiam ser os responsáveis pela tendência observada no ozônio.

O presente artigo confirma a hipótese levantada anteriormente, comprovando que de fato tanto o ozônio tem forte correlação com a temperatura, como o fato de que as temperaturas têm aumentado na cidade.

O aumento de ozônio detectado por Castelhana (2019b) pode, portanto, vir a ser uma consequência direta no incremento das temperaturas da cidade.

No caso do material particulado, as tendências observadas no âmbito das chuvas sugerem que as condições atmosféricas futuras para a cidade podem potencializar a concentração de dito poluente, dado a tendência a aumento na intensidade das chuvas, que se associa a chuvas mais concentradas.



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs possíveis perspectivas futuras para os níveis de poluição de ar de Curitiba com base apenas na relação entre qualidade do ar e variáveis climáticas. Levando em conta um cenário hipotético em que, os níveis de emissões permaneçam iguais, e que observemos apenas as mudanças climáticas detectadas, podemos afirmar que a poluição do ar na cidade pode aumentar.

O cenário desenhado para Curitiba, reforça a necessidade de buscar a redução de suas emissões através de novos programas de transporte e assegurar a importância de estudos entorno das mudanças climáticas.

O IPCC, órgão internacional responsável pela elaboração e divulgação de relatórios referentes a mudanças climáticas, não inseriu em sua lista de consequências causadas pelas mudanças climáticas, um possível aumento na poluição em decorrência das condições climáticas, alertando-nos apenas para o fato de que, temperaturas mais elevadas levariam a um maior uso de resfriadores artificiais que podem aumentar os níveis de emissão de poluentes. Assim, reforça-se o caráter exploratório e pioneiro de dito estudo.

Sabe-se que no Brasil, infelizmente poucos são os dados referentes a qualidade do ar. As redes são escassas e nem sempre os dados apresentam qualidade, sendo este, um dos principais obstáculos para a pesquisa geográfica no âmbito da qualidade do ar.

Todavia, os resultados apresentados por esta pesquisa podem e devem ser replicados em outros grandes centros, de modo a averiguar outras possíveis consequências das alterações climáticas nos níveis de qualidade do ar.

REFERÊNCIAS

BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2. ed. Bookman: Porto Alegre, 2002.

BELUSIC, A.; HERCEG-BULIC, I.; KLAIC, Z. B. Using a generalized additive model to quantify the influence of local meteorology on air quality in Zagreb, **Geofizika**, v. 32, p. 47-77, 2015.

BRANCO, S. M.; MURGEL, E. **Poluição do Ar**. 2. ed. Editora Moderna: São Paulo, 2004.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2014**, 2015. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>>. Acessado em: 26/06/2019.

CASTELHANO, F. J. **Qualidade do Ar no AUC (Agglomerado Urbano de Curitiba/PR) - Configuração Atual e Perspectivas no Âmbito das Mudanças Climáticas Globais**. Tese de Doutorado. UFPR, 2019.



CASTELHANO, F. J. Ozônio troposférico e mudanças climáticas: evidências introdutórias em Curitiba/PR, **Revista de Geografia**, v. 8, p. 35-43, Juiz de Fora, UFJF, 2019.

CONCEIÇÃO, G. M. S.; SALDIVA, P. H. N.; SINGER, J. M. Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbi-mortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo, **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 4, n. 3, p. 206-219, 2001.

CZERNECKI, B.; POLROLNICZAK, M.; KOLENDOWICZ, L.; M. KENDZIERSKI, S.; PILGUJ, N. Influence of the Atmospheric Conditions on PM10 Concentrations in Poznan, Poland, **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 74, p. 115-139, 2017.

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

DOMINICI, F.; MCDERMONTT, A.; ZEGER, S. L.; SAMET, J. M. On the Use of Generalized Additive Models in Time-Series Studies of Air Pollution and Health, **American Journal of Epidemiology**, v. 156, n. 3, p. 193-203, 2002.

FOX, J.; WEISBERG, S. **An R Companion to Applied Regression 2**. Edição. Sage, 2011.

JIMENEZ, A. M., TORRECILLA, R. C., Environmental Justice and Sulphur Dioxide Atmospheric Pollution. In Madrid: a Spatio-Temporal Analysis and Assessment with Gis, **Boletín de La A.G.E.**, n. 44, p. 391-394, 2007.

KEGGENHOFF, I., ELIZBARASHVILI, M., AMIRI-FARAHANI, A., KING, L. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971–2010, **Weather and Climate Extremes**, v. 4, p. 75-85, 2014.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4. Edição. London: Charles Griffin, 1975.

KUMAR, P. ANDRADE, M. F, YNOUE, R. Y, FORNARO, A., FREITAS, E. D., MARTINS, J. MARTINS, L. D., ALBUQUERQUE, T. e ZHANG, Y., New directions: From biofuels to wood stoves: The modern and ancient air quality challenges in the megacity of São Paulo, In: **Atmospheric Environment**, v. 140, p. 364-369, 2016.

LIMA, L. P., **Modelos Aditivos Generalizados**: aplicação a um estudo epidemiológico ambiental, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2001.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, vol. 13, n. 3, p. 245- 259 p. In: **The Econometric Society**, 1945.

McCORMAC, B. M., **Introduction to the Scientific Study of Atmospheric Pollution**, D. Reidel Publishing Company, 1971.

MOREIRA, J. G. V., NAGHETTINI, M., Detecting Monotonous Time Trends as Related to Type I and Type II Errors: Case Study in Annual Maximum Daily Precipitation Series Observed in the State of Acre, In: **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 394-402, 2016.

PEARCE J. L., BERINGER, J. NICHOLLS, N., HYNDMAN, R. J., TAPER, N. J., Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models, In: **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 1328-1336, 2011.



PENG, R.D., DOMINICI, F. e LOUIS, T.A., **Model choice in time series studies of air pollution and mortality**, Journal of the Royal Statistics Society, v. 169, parte 2, p. 179-203, 2006.

PETERSON, T. C., FOLLAND, C., GRUZA, G., HOGG, W., MOKSSIT, A. PLUMMER, N., **Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs**, ETCCDI, 2001.

PINHEIRO, G. M. **Variabilidade Temporo-Espacial da Pluviosidade da Bacia do Alto Iguaçu**, Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, 2016.

RAZAVI, T. SWITZMAN, H. ARAIN, A. COULIBALY, P., Regional climate change trends and uncertainty analysis using extreme indices: A case study of Hamilton, Canada, In: **Climate Risk Management**, v. 13, p. 43-63, 2016.

SCHIRMER, W. N.; LISBOA, H. M. Química da Troposfera: constituintes naturais, poluentes e suas reações. In: **Tecnológica Santa Cruz do Sul**, v. 12, n. 2, p. 37-46, 2008.

TOBIÁS, A. e SAEZ, M. Time-series regression to study the short-term effects of environmental factors on health, **Document de treball**, Girona (Espanha), 2004.

Recebido em 03 de Janeiro de 2020
Aprovado em 03 de Fevereiro de 2020