

ANÁLISE GEOESTATÍSTICA PARA PREDIÇÃO DO OZÔNIO NA REGIÃO NORTE DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

Camila Bosco da Silva¹
Alexander Sérgio Evaso¹

RESUMO

O ozônio é considerado um poluente secundário, formado na troposfera e que resulta de reações fotoquímicas envolvendo hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e radiação solar. Ficar exposto ao ozônio poluente pode provocar irritação nos olhos e nas vias respiratórias, agravando doenças pré-existentes, como asma e bronquite. Esta pesquisa baseou-se na predição geoestatística do ozônio poluente em regiões da zona norte da cidade de São Paulo, onde há pouca cobertura de estações de monitoramento. Assim, com base na alta correlação entre ozônio e temperatura encontrada nos postos da área de Santana, construiu-se uma equação ajustada, o que permitiu o uso de dados de monitoramento da temperatura do Centro de Gerenciamento de Emergências (CGE) para enriquecer a predição com ozônio calculado com base na temperatura. Finalmente, após a elaboração de camadas (layers) geoestatísticas, os mapas permitiram demonstrar a variação espacial e o possível comportamento do ozônio poluente em toda a região norte do município de São Paulo, especificamente nos períodos de verão e inverno entre 2013 e 2015.

Palavras-chaves: Poluição Atmosférica; Ozônio; Poluente Secundário; Geoestatística.

ABSTRACT: GEOSTATISTICAL ANALYSIS FOR PREDICTION OF OZONE IN THE NORTHERN REGION OF THE CITY OF SÃO PAULO

Ozone is secondary pollutant, formed in the troposphere, which results from photochemical reactions that require the combined presence of hydrocarbons, nitrogen oxides and solar radiation. Someone exposed to ozone will be prone to irritation in the eyes and respiratory tract, and aggravation of preexisting conditions, such as asma and bronchitis. The research is based on the geostatistical prediction of ozone in the northern São Paulo districts, where there is poor monitoring station presence. Therefore, based in the high correlation between ozone and temperature at the regional Santana station, a linear equation has been constructed, allowing to use temperature monitoring stations to enrich the prediction with calculated ozone. Finally, after the elaboration of geostatistical layers, the maps allowed the view of spatial variation and therefore the probable behavior of the pollutant in all the northern portion of the city of São Paulo, specifically in summer and winter periods between 2013 and 2015.

Key Words: Atmospheric Pollution; Ozone; Secondary Pollutant; Geoestatistical.

1 Faculdades Metropolitanas Unidas - FMU. E-mail: camilaboscossilva@gmail.com

INTRODUÇÃO

A poluição pode ser entendida como fonte de degradação ambiental, uma vez que transforma as características de um meio de forma deletéria. Os principais tipos de poluição são a hídrica e a atmosférica e para direcionar ações relacionadas a recuperação do meio afetado, é necessário compreender como ocorre a dispersão do poluente.

As formações do ozônio (O_3) na troposfera são obtidas pelas reações fotoquímicas envolvendo hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e a radiação solar. O ozônio na tropopausa, ou seja, na camada que separa a troposfera da estratosfera, a cerca de 15 km de altura do solo, age como um gás de efeito estufa. Este ozônio é parcialmente formado devido às emissões de aviões, mas as trocas com a estratosfera e o transporte por precursores da superfície também são importantes. (NEVES, 2009).

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2014), a formação do ozônio na atmosfera inicia-se pela fotólise do dióxido de nitrogênio (NO_2). O produto desta reação o NO, reage rapidamente com o ozônio (O_3) para regenerar o dióxido de nitrogênio (NO_2).

A formação do ozônio também pode ser realizada por meio dos chamados Compostos Orgânicos Voláteis, ou “COVs” (do inglês “VOCs” – Volatile Organic Compounds). Conforme ALVIM (2011), os dez compostos mais importantes na formação de ozônio (O_3) na cidade de São Paulo são: 1-buteno (6,8%), eteno (6,5%), formaldeído (6,1%), acetaldeído (5,5%), tolueno (4,8%), 1-etil-4-metilbenzeno (3,7%), trans-2-penteno (3,7%), propeno (3,7%), trans-2-buteno (3,5%) e 1-metilciclopenteno (3,5%). A velocidade de formação do ozônio depende da quantidade e da reatividade de cada um desses compostos.

OZÔNIO

Na troposfera o ozônio é considerado um poluente secundário, ou seja, não é emitido de forma direta pelas fontes estacionárias ou móveis, mas formado na atmosfera mediante reações fotoquímicas de gases precursores provenientes de fontes antropogênicas ou naturais. (CETESB, 2014).

Devido ao seu efeito danoso à saúde humana e à vegetação, o ozônio é um dos poluentes monitorados pela CETESB, de acordo com a Resolução CONAMA nº 05 de 1989, Resolução CONAMA nº 03 de 1990 e o Decreto Estadual do Estado de São Paulo nº 59.113 de 2013.

A resolução CONAMA 003/90 estabelece: tempo de amostragem de 1 (uma) hora, com padrões primários e secundários de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No entanto Decreto Estadual do Estado de São Paulo nº 59.113 de 2013 que estabelece novos Padrões Estaduais de Qualidade do Ar: deve possuir um tempo de amostragem de 8 (oito) horas e o valor de concentração do ozônio não deve ultrapassar $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

EFEITOS DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO

O ozônio poluente mesmo em baixas concentrações pode afetar a saúde, e por isto sua presença no ar ambiente é uma das maiores preocupações atualmente, principalmente nas regiões situadas próximas às grandes cidades. (FREITAS, et al., 2005).

Podendo provocar irritação nos olhos e nas vias respiratórias, agravando doenças pré-existentes, como asma e bronquite, reduzindo as funções pulmonares e aumentar a suscetibilidade a infecções pulmonares. (Ministério da Saúde, 2013).

As pessoas que vivem em áreas onde os níveis de ozônio são frequentemente altos podem achar que os sintomas iniciais desaparecem ao longo do tempo. No entanto, ozônio pode continuar prejudicando os pulmões, mesmo quando os sintomas não são aparentes. Quando os níveis de ozônio estão elevados, uma das maneiras de proteger a saúde é tentar minimizar a exposição ao poluente como, por exemplo, evitar a realização de exercícios físicos nas horas mais críticas. (USEPA, 2012).

Na vegetação, embora o ozônio e outros oxidantes fotoquímicos sejam fitotóxicos, as respostas das plantas e as ações incidentes na vegetação podem ser modificadas por uma série de fatores biológicos (insetos e pragas), químicos (nutrientes presentes no solo) e físicos (luz, temperatura e umidade), provocando o fechamento dos estômatos e limitando a fixação de dióxido de carbono (CO_2), o que dificulta o processo bioquímico da fotossíntese. Algumas culturas como o tabaco e o espinafre, são muito sensíveis aos danos causados pelo ozônio, enquanto outras culturas são mais resistentes.

METODOLOGIA

O ozônio troposférico está diretamente relacionado à altas temperaturas, devido sua característica fotoquímica. O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para gerar uma equação de correlação para cada posto de monitoramento do Centro de Gerenciamento de Emergência – CGE, utilizando como variáveis os índices de ozônio troposférico e os índices de temperatura.

Com isso, poderemos estimar os níveis de ozônio troposférico nas regiões da zona norte da cidade de São Paulo, onde não há cobertura suficiente de postos de monitoramento da CETESB. E com aplicação dos dados no *Geostatistical Analyst* teremos uma melhor interpolação de informações para estimar o ozônio troposférico.

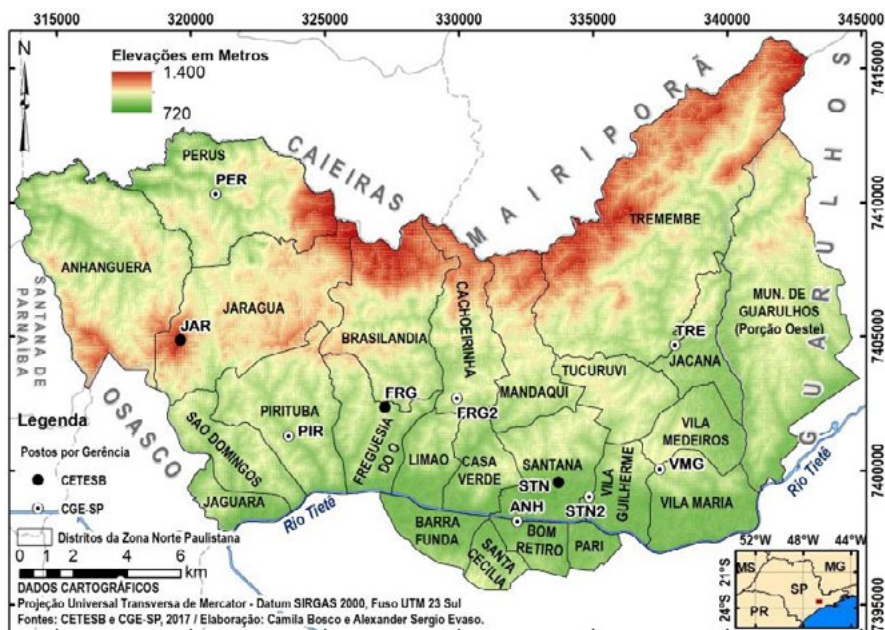


Figura 1.

Localização dos postos.

Para a obtenção dos dados de concentração do ozônio troposférico, foram utilizados os dados das redes de monitoramento da CETESB, por meio do sistema informatizado QUALAR. Sendo assim obtidos os dados das estações de monitoramento de Santana (STN), Nossa Senhora do Ó (FRG), Parque Dom Pedro (DPE), Pico do Jaraguá (JAR) e Guarulhos – Paço Municipal (GRU).

Para a obtenção dos índices de temperatura, foram utilizados os dados dos postos de monitoramento do Centro de Gerenciamento de Emergência - CGE. Os dados das estações de monitoramento de Freguesia do Ó, Perus, Pirituba/Jaraguá, Santana/Tucuruvi, Jaçanã/Tremembé e Vila Maria/Vila Guilherme foram usados para a empreitada.

Para compilação dos dados, foi adotado o período entre os anos de 2013 a 2015, durante o verão e o inverno, especificamente na faixa horária das 12h00 às 17h00, a fim de observar a evolução da ocorrência e concentração do ozônio troposférico nesses horários críticos.

Com os períodos definidos, calculou-se 03 (três) médias da concentração do ozônio poluente e temperatura para o verão e o inverno dos respectivos anos. Considerando que o objetivo é obter o período exato das estações verão e inverno, no cálculo da 1ª média foram incluídos os 11 (onze) primeiros dias do verão, que iniciam no mês de dezembro do ano anterior.

Tabela 1.

Períodos das médias.

Verão		Inverno	
1º média	21/12 a 20/01	1º média	21/06 a 21/07
2º média	21/01 a 20/02	2º média	22/07 a 21/08
3º média	21/02 a 20/03	3º média	22/08 a 21/09

Fonte: Próprio autor.

CORRELAÇÃO DE PEARSON

Para obter a equação de correlação para os postos de monitoramento do Centro de Gerenciamento de Emergência – CGE a fim de calcular o ozônio, será utilizado o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

Resumidamente, o coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis. (FIGUEIREDO FILHO et. 2009). Ou seja, permite estabelecer o grau de correlação entre duas variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que a pontuação de uma variável pode ser determinada exatamente ao se saber a pontuação da outra. No outro oposto, uma correção de valor zero, indica que não há relação linear as variáveis. (FIGUEIREDO FILHO et. 2009).

COMPILAÇÃO DOS DADOS

Durante a compilação dos dados de temperatura obtidos pelos postos de monitoramento do Centro de Gerenciamento de Emergência – CGE, foram encontrados alguns embaraços em relação a falta de dados, do posto de Tremembé, referente aos anos de 2013 a 2015, os postos do Anhembi e de Vila Maria – Vila Guilherme em relação ao verão de 2013 e 2014 e no posto de Santana-Tucuruvi, com os dados faltantes do verão de 2015.

Para resolver estes casos, foram feitas equações ajustadas utilizando um ou mais postos de monitoramento, afim de estimar os dados naquele determinado período e obter a cobertura dos dados faltantes. As altas correlações permitem conter até certo ponto a propagação de erros de estimativa.

Tabela 2.

Equações ajustadas utilizadas para obtenção dos dados faltantes

Posto de Monitoramento	Equação Ajustada	Correlação
Anhembi	$(0,748995 * \text{FREGUESIA DO Ó}) + 5,316397$	84,15%
Santana-Tucuruvi	$(0,943513 * \text{FREGUESIA DO Ó}) + 1,846989$	97,18%
Tremembé	$23,995564 + 0,1213471*(\text{VILA MARIA-GUILHERME}) - 0,173795 (\text{FREG. DO Ó})$	96,93%
Vila Maria/Vila Guilherme	$(0,876863 * \text{FREGUESIA DO Ó}) + 3,868053$	84,42%

Fonte: Próprio autor

Os postos do Centro de Gerenciamento de Emergência- CGE ainda apresentaram valores inconsistentes após as equações ajustadas, mas optamos por eliminá-los. Com a falta dos dados resolvida, partimos para fase de desenvolvimento da equação de correlação entre ozônio e temperatura, calculado para a série histórica de Santana. Esta permitiu uma alta correlação da temperatura com os índices de ozônio poluente obtidos, chegando a cerca de 95% de correlação.

Tendo em vista esse resultado positivo, optou-se por extrapolar a estimativa para os demais distritos do norte da cidade de São Paulo, por conta de que algumas destas regiões não possuem monitoramento do ozônio poluente, mas que oferecem o monitoramento da temperatura pelo CGE. Com isso, se faz possível a estimativa do índice do ozônio poluente, utilizando-se a equação ajustada “mãe” de Santana, a seguir:

$$Y=8,764X-165,5$$

Onde:

Y = Valor estimado de Ozônio;

X = Valor de temperatura, em graus Celsius (°C).

Com os valores calculados, o próximo e último passo foi o processamento dos dados no ArcGIS 10.4 (ESRI®). Nessa fase os dados foram introduzidos no módulo *Geostatistical Analyst* do ArcGIS (ESRI®), no período do verão e do inverno dentre os anos de 2013 a 2015.

Com os postos devidamente correlacionados utilizando-se a equação mãe, aplicou-se o um algoritmo de krigagem de predição (do Inglês “*kriging*”), que é usualmente aplicado na geoestatística para análises correlacionadas à poluição atmosférica. Essa metodologia é amplamente difundida inclusive pelo fabricante do software ArcGIS (ESRI).

O processamento no software ArcGIS 10.4 (ESRI®), foi realizado pelo módulo do *Geostatistical Analyst* com o método da krigagem, configurado para o tipo ordinário, com o objetivo de criar uma superfície de dados preditivos (estimativa de valores). Esta é a modalidade mais simples de interpolação desse método, e as demais configurações foram mantidas no padrão sugerido pela ESRI.

Para a legenda dos mapas foi utilizado os intervalos de cores utilizadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB para qualidade do ar, no entanto as classes de cores foram divididas, com tonalidades similares de cor, para melhorar a análise dos índices do ozônio poluente e o maior detalhamento do mapa, de acordo com a tabela a seguir.

Tabela 3.

Legenda dos mapas

Parâmetro	Índice
30 a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Bom
50 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moderado baixo
70 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moderado
80 a 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ruim
90 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Muito ruim
100 a 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
$\geq 110 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Péssimo

Fonte: Baseado nos Relatórios de Qualidade do Ar da CETESB.

RESULTADOS

A seguir serão apresentados os mapas gerados por meio do *Geostatistical Analyst* do ArcGIS (ESRI®) que resultaram dos dados obtidos por meio da equação de correlação entre temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e ozônio poluente (O_3), seguidos de comentários aos períodos retratados.

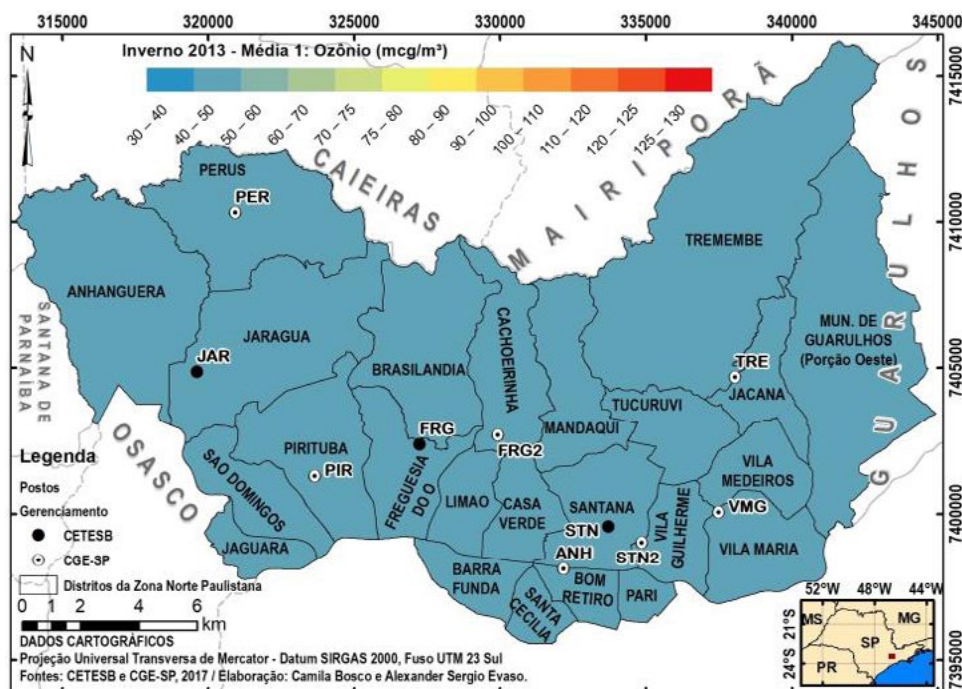


Figura 2.

Média 1 (21/06 a 20/07) do Inverno de 2013

No mapa em que representa o índice de ozônio poluente no início do inverno de 2013, observamos o índice bom, variando entre 30 a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em toda região norte da cidade de São Paulo.

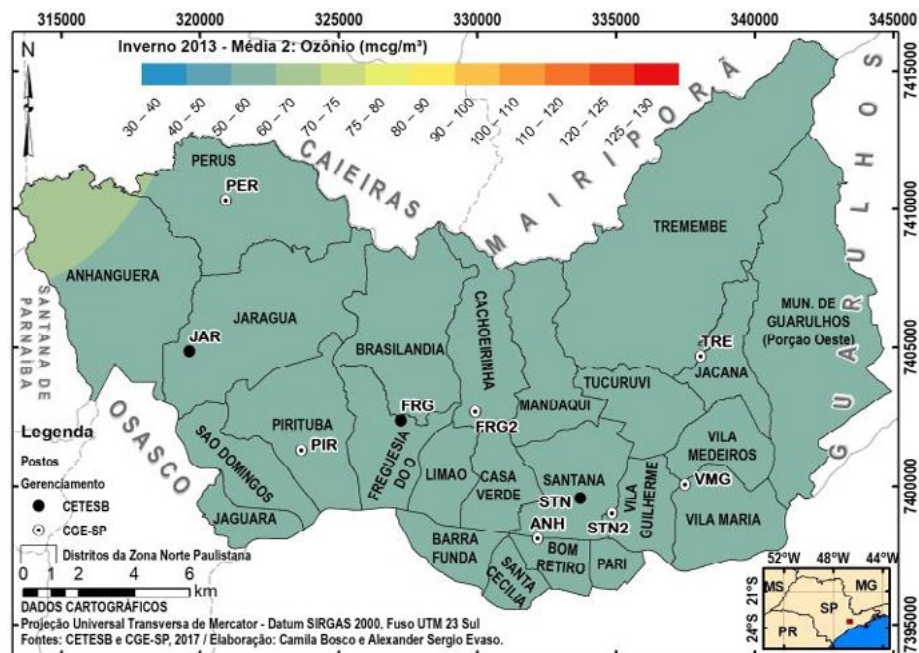


Figura 3.

Média 2 (22/07 a 21/08) do Inverno de 2013.

Para o mapa em que representa o índice de ozônio poluente no meio do inverno de 2013, nos apresenta o índice moderado baixo em toda a região norte da cidade de São Paulo, variando entre 50 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, no entanto apenas em uma pequena região do distrito de Anhanguera, apresentou um índice moderado, que varia entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

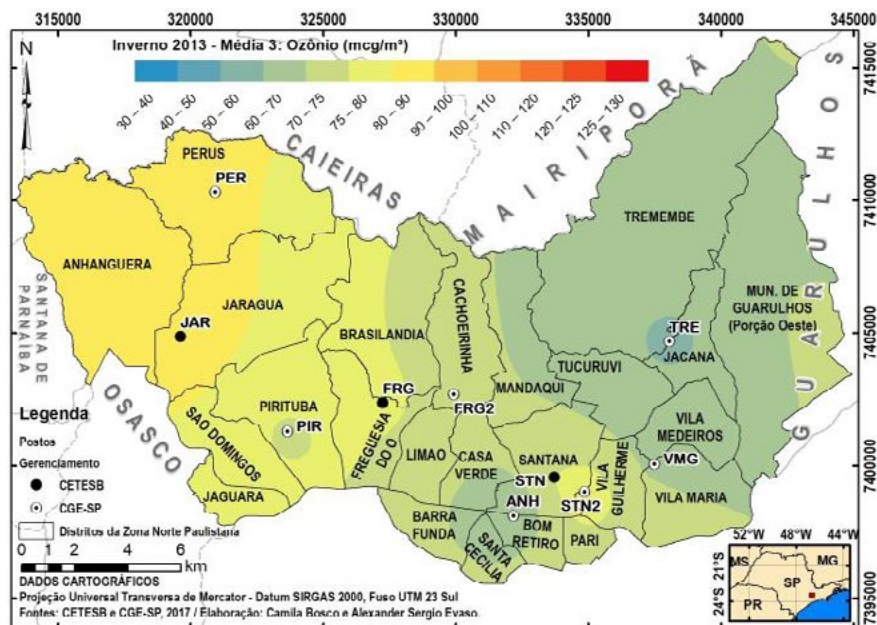


Figura 4.

Média 3 (22/08 a 21/09) do Inverno de 2013.

No mapa em que representa o índice de ozônio poluente no final do inverno de 2013, observamos um cenário com muitas oscilações. Uma pequena região ao redor do posto de monitoramento (CGE) do Anhembi e a região dos distritos de Tucuruvi, Tremembé, Jaçanã e Vila Medeiros, apresentaram índices moderado baixo do ozônio poluente, entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Na região dos distritos de Cachoeirinha, Limão, Santana, parte da Brasilândia e Freguesia do Ó e pequena área ao redor do posto de monitoramento (CGE) de Pirituba, apresentaram os índices moderados, entre 70 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

No entanto a região dos distritos de Jaraguá e Anhanguera, apresentaram o índice ruim, variando entre 80 a 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

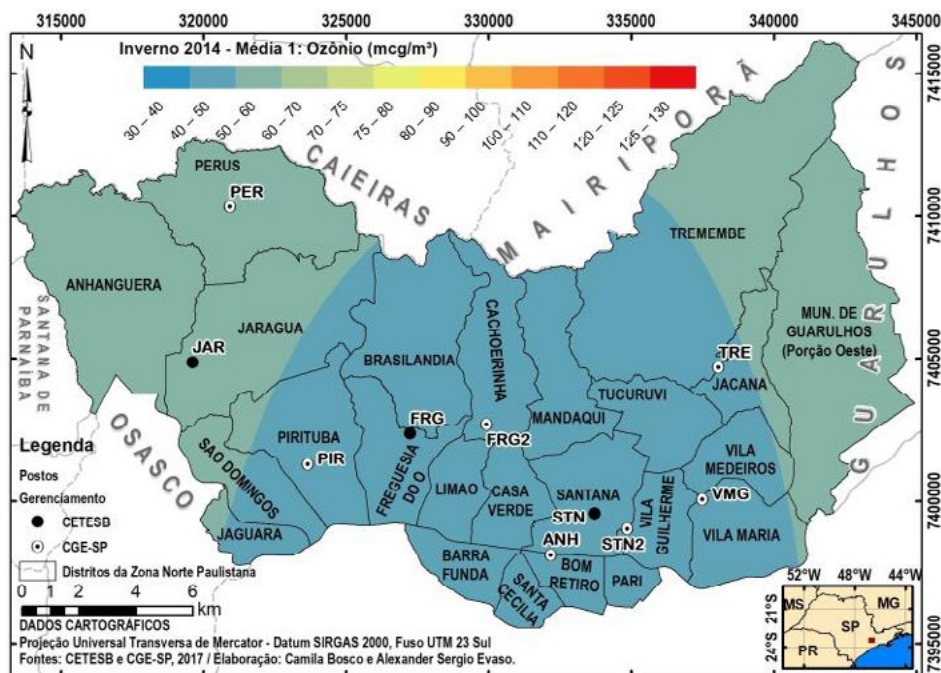


Figura 5.

Média 1 (21/06 a 20/07) do Inverno de 2014.

Para o mapa que representa o índice de ozônio poluente no início do inverno de 2014, observamos o meio da região norte, do distrito entre Pirituba até parte dos distritos de Jaçanã e Vila Maria, com índices bons, variando entre 30 a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Todavia, suas extremidades, no entanto onde inclui os distritos de Anhanguera, Perus, Jaraguá e parte de Tremembé, Jaçanã e o município de Guarulhos, apresentaram o índice moderado baixo, entre 50 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

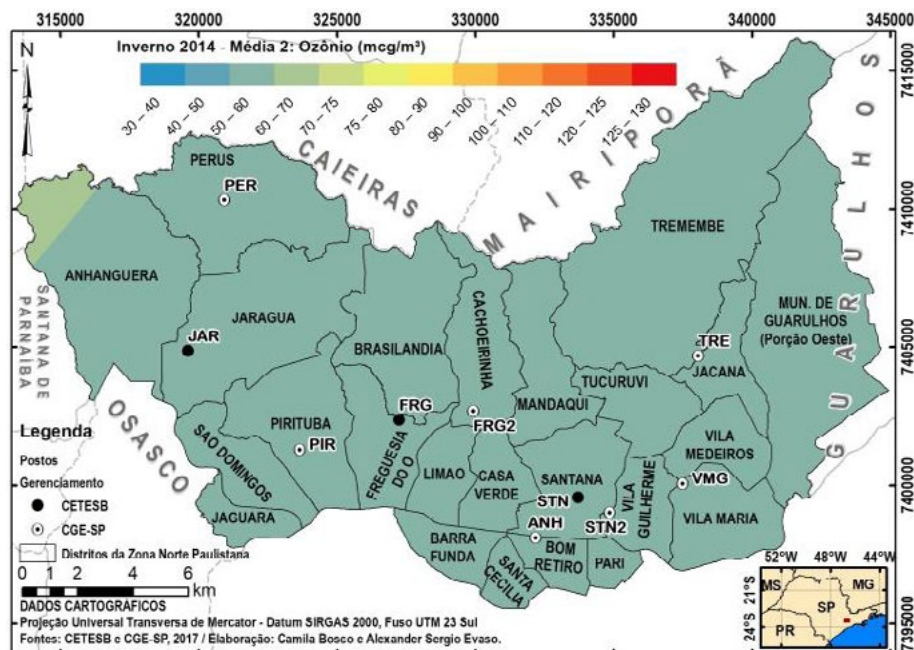


Figura 6.

Média 2 (22/07 a 21/08) do Inverno de 2014.

No mapa que representa os índices de ozônio poluente no meio do inverno de 2014, nos apresenta o índice moderado baixo em toda a região norte da cidade de São Paulo, variando entre 50 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, incluindo a pequena região do distrito de Anhanguera.

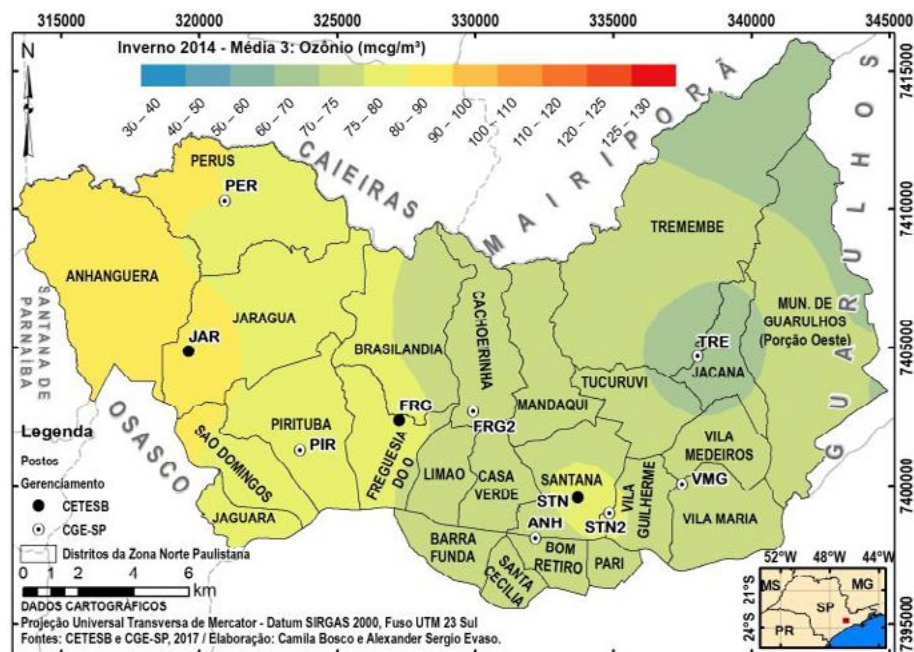


Figura 7.

Média 3 (22/08 a 21/09) do Inverno de 2014.

Para o mapa que representa os índices de ozônio poluente no final do inverno de 2014, observamos as oscilações dos índices. O distrito de Anhanguera, parte de Perus e Jaraguá, apresentaram o índice ruim, variando entre 80 a 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Uma pequena região em torno do posto de monitoramento (CGE) de Tremembé e parte do noroeste do distrito de Tremembé e do município de Guarulhos, apresentaram o índice moderado baixo, entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Os demais distritos apresentaram o índice moderado de ozônio poluente, variando entre 60 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

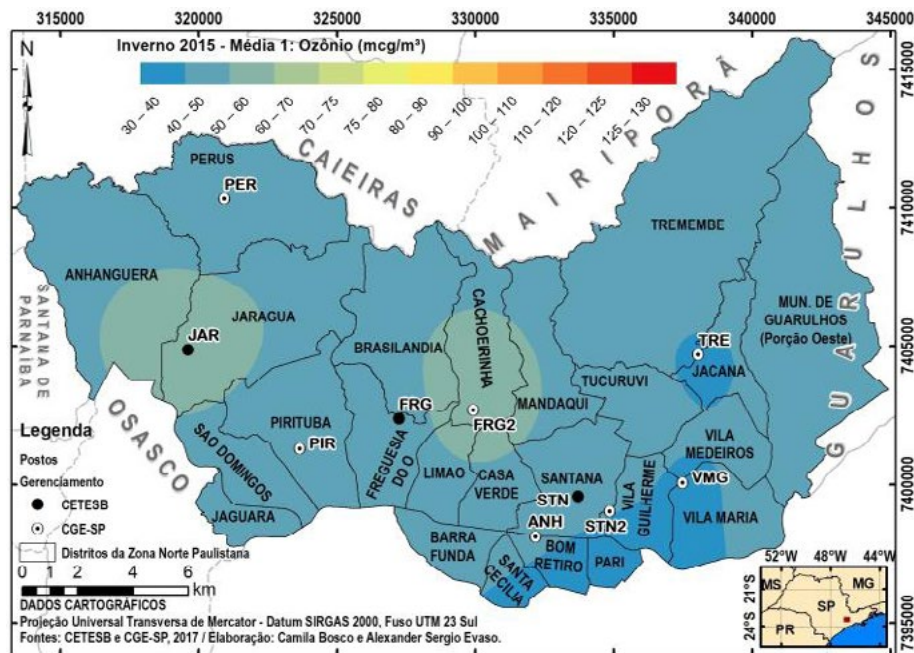


Figura 8.

Média 1 (21/06 a 20/07) do Inverno de 2015.

No mapa que representa os índices de ozônio poluente no início do inverno de 2015, uma pequena região ao redor do posto de monitoramento (CETESB) abrangendo os distritos de Anhanguera e Jaraguá e outra região próxima ao posto de monitoramento (CGE) da Freguesia do Ó, abrangendo os distritos de Cachoeirinha, Mandaqui, Limão e Casa Verde, apresentaram o índice moderado baixo, variando entre 50 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Os demais distritos da região norte da cidade de São Paulo, apontaram índices bons, variando entre 30 a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 30 a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

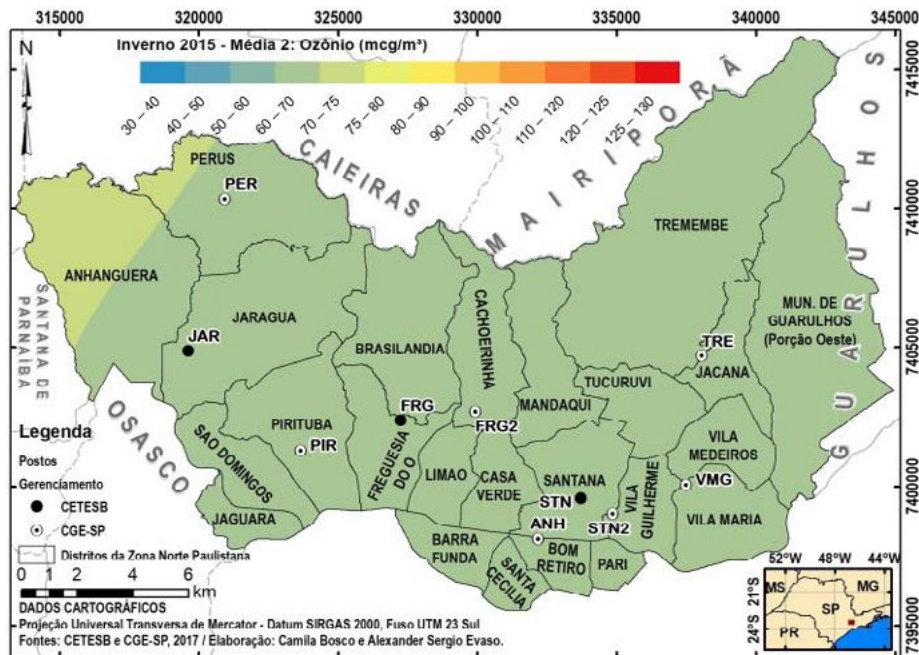


Figura 9.

Média 2 (22/07 a 21/08) do Inverno de 2015.

Para o mapa que representa os índices de ozônio poluente no meio do inverno de 2015, observamos que toda a região norte da cidade de São Paulo apresentou índices moderado baixo, que varia entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

No entanto, apenas a pequena área, que abrangem os distritos de Anhanguera e Perus, apresentou índice moderado, entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

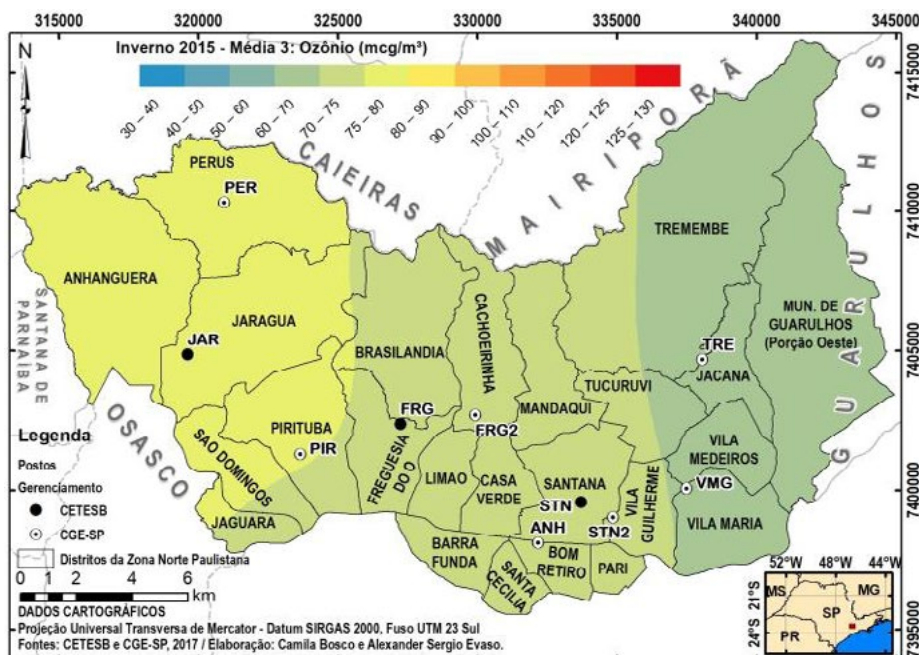


Figura 10.

Média 3 (22/08 a 21/09) do Inverno de 2015.

Para o mapa que representa os índices de ozônio poluente no final do inverno de 2015, observamos os índices divididos. Do distrito de Tremembé até o distrito de Vila Maria, apresentou-se o índice moderado baixo, entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A partir do distrito de Vila Guilherme, passando pelo distrito da Brasilândia até distrito de Anhanguera apontaram os índices moderado, variando entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 75 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

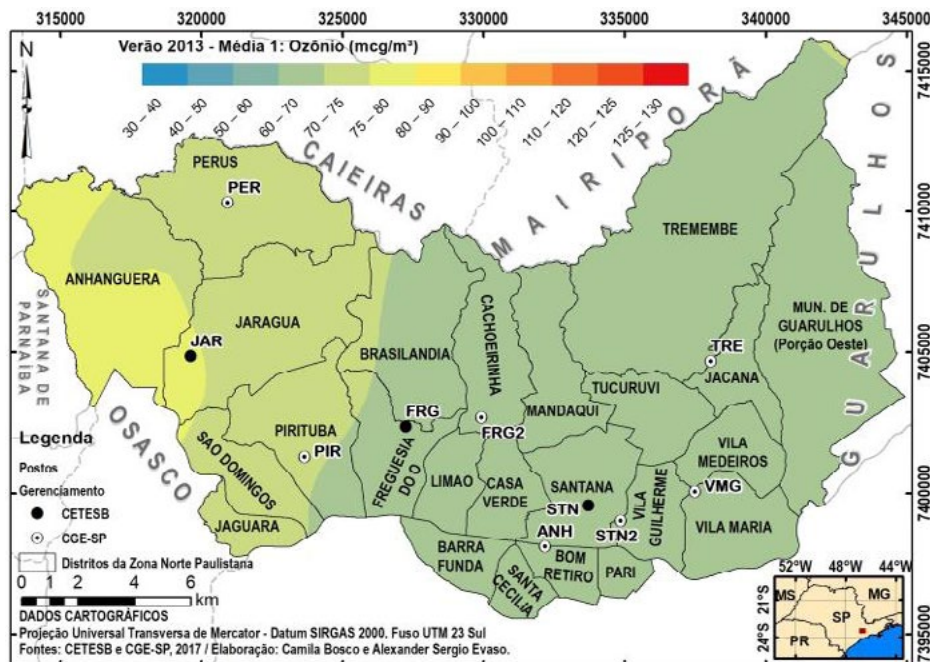


Figura 11.

Média 01 (21/12 a 20/01) do Verão de 2013.

No mapa que representa os índices de ozônio poluente no início do verão de 2013, observamos que desde o município de Guarulhos até parte dos distritos da Brasilândia e Pirituba, foi apresentado os índices moderados baixo, entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A partir das áreas do distrito de Pirituba até o distrito de Anhanguera, foi apresentado os índices moderado, entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 75 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

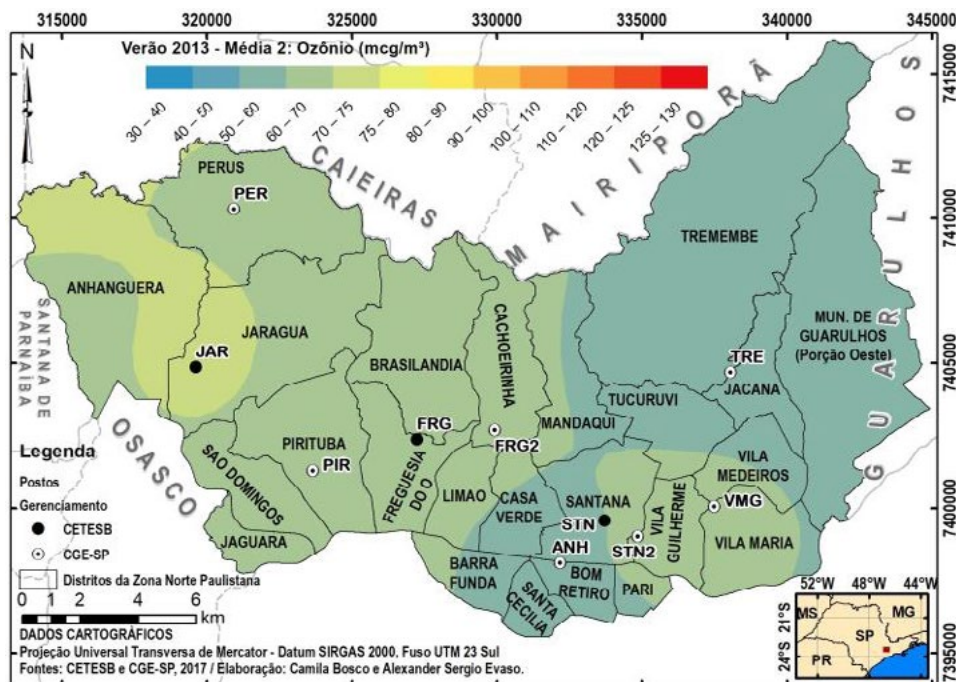


Figura 12.

Média 02 (21/01 a 20/02) do Verão de 2013.

Para o mapa que representa os índices de ozônio poluente no meio do verão de 2013, cerca de toda região norte da cidade de São Paulo, apresentaram os índices moderado baixo entre 50 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Apenas uma região próxima ao posto de monitoramento (CETESB) do Jaraguá, abrangendo os distritos do Jaraguá e Anhanguera, apresentou o índice moderado, entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

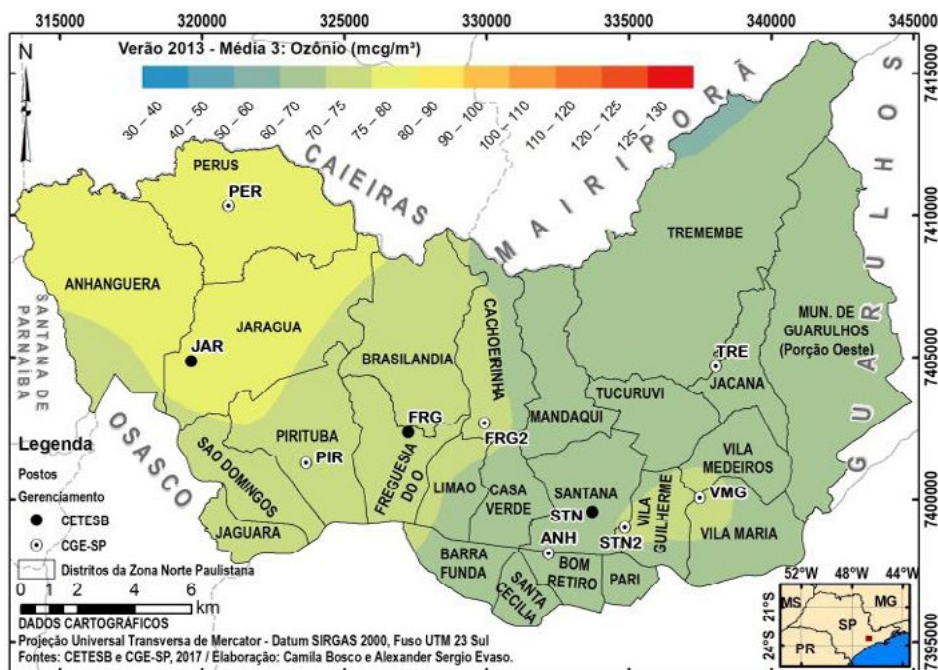


Figura 13.

Média 03 (21/02 a 20/03) do Verão de 2013.

Para o mapa que representa os índices de ozônio poluente no final do verão de 2013, uma pequena extremidade do distrito de Tremembé, apontou índice moderado baixo entre 50 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Do município de Guarulhos até uma parte do distrito de Cachoeirinha e Limão, observamos os índices moderado baixo entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A partir da metade do distrito do Cachoeirinha e Limão, até o distrito de Anhanguera e em conjunto com uma pequena região próximo aos postos de monitoramento (CGE) de Santana e Vila Maria/Vila Guilherme, que abrange os distritos de Vila Guilherme, parte do distrito de Vila Maria e Vila Medeiros apresentaram o índice moderado, variando entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 75 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

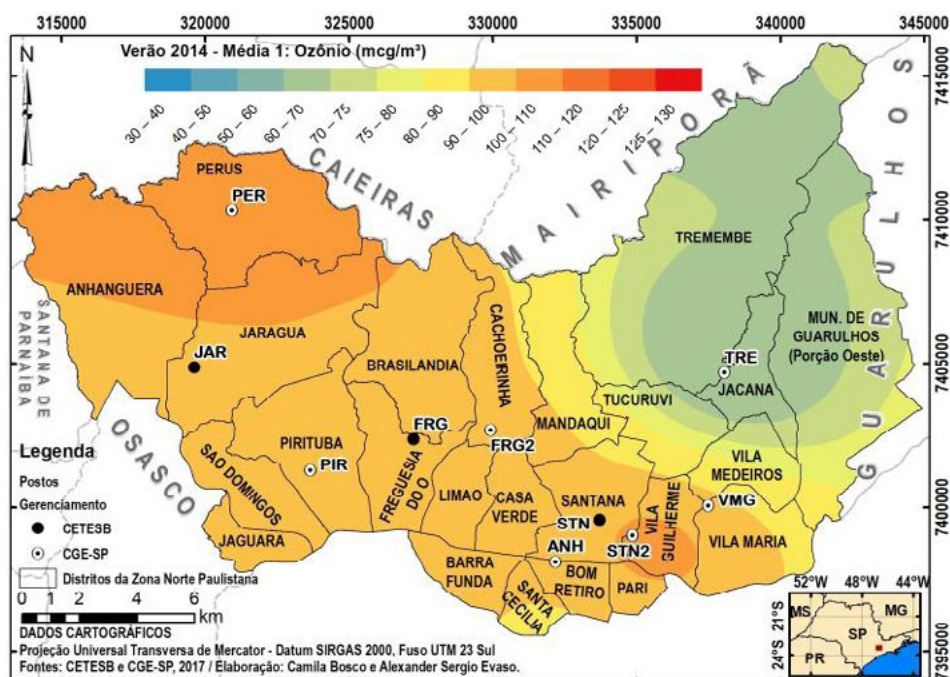


Figura 14.

Média 01 (21/12 a 20/01) do Verão de 2014.

Observamos uma grande oscilação no mapa que representa os índices de ozônio poluente no início do verão de 2014. Na região do distrito de Jaçanã, próximo ao posto de monitoramento CGE de Tremembé, que abrange parte do distrito de Tremembé e da porção oeste do município de Guarulhos, é apresentado os índices moderado baixo de ozônio poluente, entre 60 e 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

No entanto, nesta mesma região, temos duas faixas de índices moderados, variando entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 75 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, faixas estas incluindo o distrito do Tremembé, Tucuruvi e Vila Medeiros.

Na região próximo aos postos de monitoramento (CGE) de Perus e Santana, foi observado os níveis muito ruins de ozônio poluente, variando entre 100 a 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

As demais áreas dos distritos da zona norte da cidade de São Paulo, também apontaram níveis muito ruins, no entanto variando entre 90 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

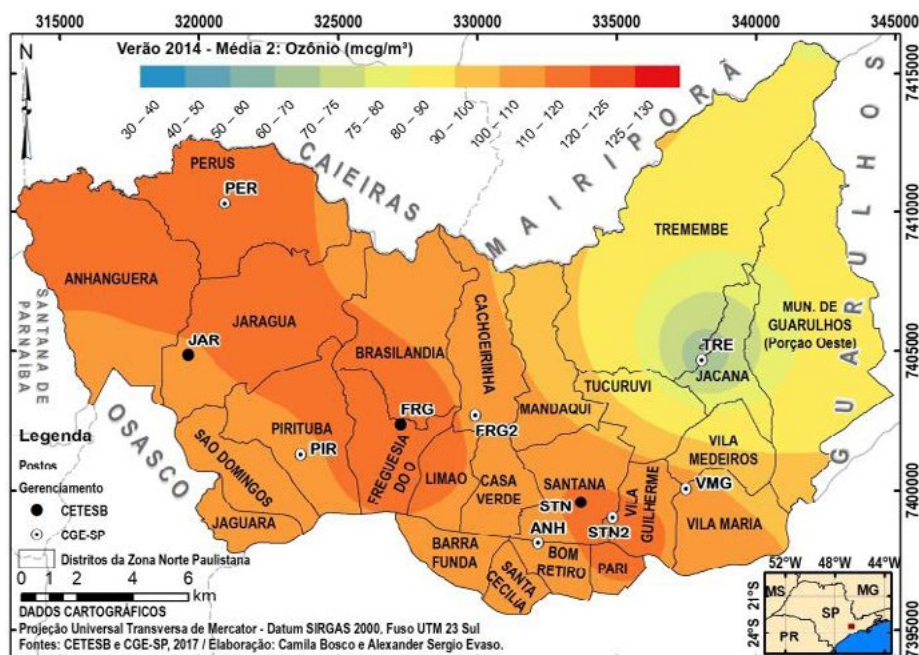


Figura 15.

Média 02 (21/01 a 20/02) do Verão de 2014.

Observamos maiores índices de ozônio poluente, no mapa que representa o meio do verão de 2014. Existe uma área muito pequena e próxima ao posto de monitoramento (CGE) de Tremembé, onde foi apresentado o índice moderado baixo, entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Logo depois, observamos duas faixas entre os distritos de Jaçanã, parte de Tremembé e o município de Guarulhos, com os índices moderados, variando entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 75 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Grande parte dos distritos de Tremembé, Vila Medeiros, Tucuruvi, apontaram os índices ruins, entre 80 a 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente. As regiões dos distritos de Vila Maria, Cachoeirinha, Casa Verde, São Domingos, Bom Retiro, Barra Funda, Santa Cecília e parte do Limão, Brasilândia, Pirituba, Santana e Vila Guilherme, apresentaram índices muito ruins, entre 100 a 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

No entanto, observamos também uma extensa área abrangendo os distritos de Anhanguera, Perus, Jaraguá, Brasilândia, Freguesia do Ó, Limão e Pirituba, juntamente com uma pequena área na região do posto de monitoramento de Santana, que apresentaram níveis péssimos de ozônio poluente, variando entre 110 a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

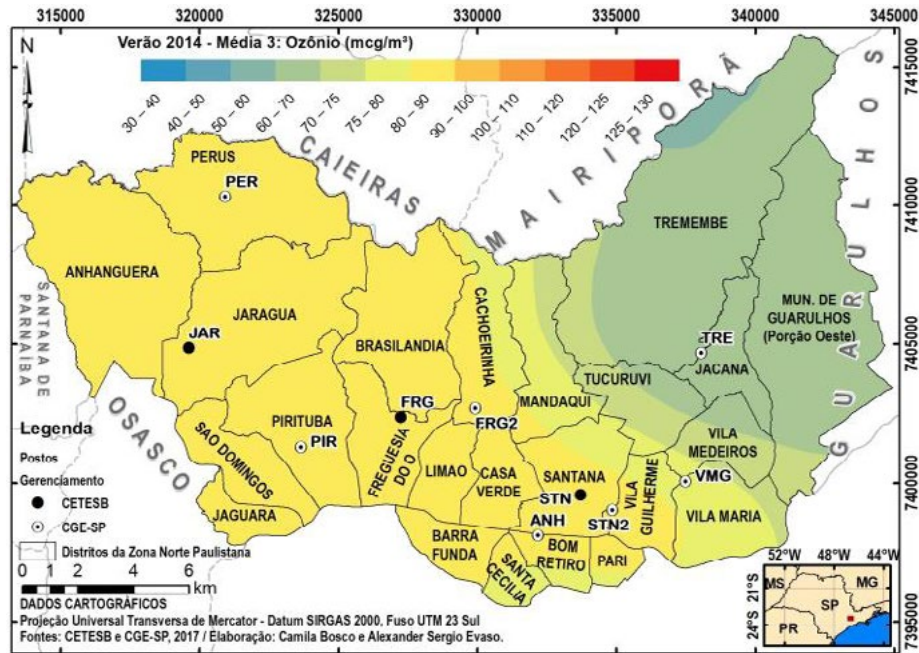


Figura 16.

Média 03 (21/02 a 20/03) do Verão de 2014.

Para o mapa que representa os índices de ozônio poluente no final do verão de 2014, observamos índices moderado baixo entre 50 a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e 60 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nos distritos de Tremembé, Jaçanã e parte oeste do município de Guarulhos.

Já nas regiões que abrangem os distritos do Tucuçuvi, Vila Medeiros, Vila Maria e Mandaqui, estes apresentaram os índices moderado, variando em 70 a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e 75 a $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nas demais áreas desde o distrito de Vila Guilherme até o distrito de Anhanguera, estes apontaram índices ruins entre 80 a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

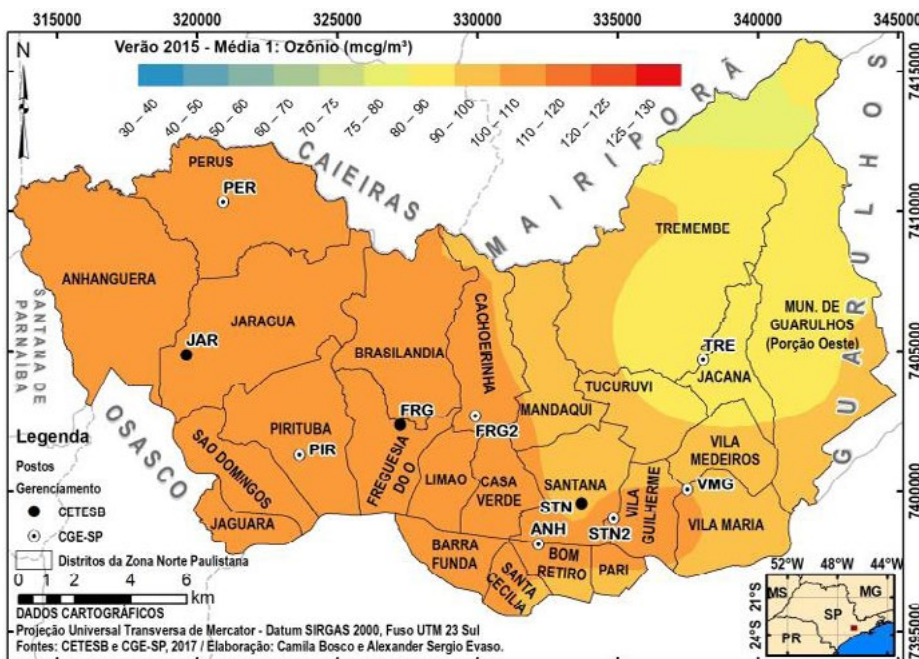


Figura 17.

Média 01 (21/12 a 20/01) do Verão de 2015.

No mapa representando os índices de ozônio poluente no início do verão de 2015, desde o distrito de Anhanguera, passando pelo distrito da Brasilândia, Mandaqui, Santana até Vila Maria e parte do município de Guarulhos foram observados índices muito ruins, variando entre 90 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 100 a 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

As áreas restantes que abrangem os distritos do Jaçanã, Tremembé, parte do Tucuçuvi e Vila Medeiros, apresentaram índices ruins entre 75 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 80 a 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

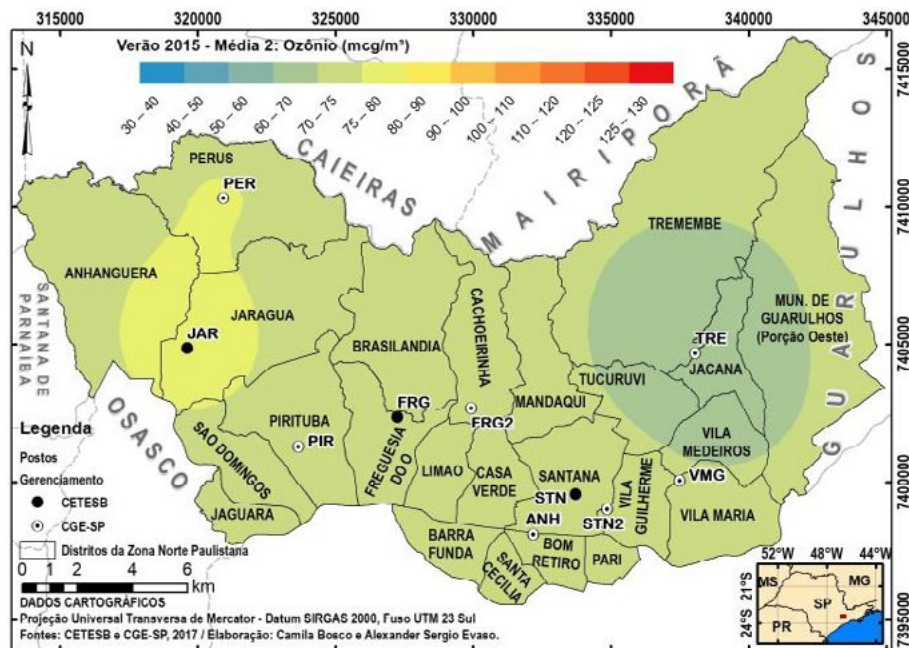


Figura 18.

Média 02 (21/01 a 20/02) do Verão de 2015.

Para o mapa representando os índices de ozônio poluente no meio do verão de 2015, observamos uma região próxima ao posto de monitoramento (CGE) de Tremembé, abrangendo os distritos do Tucuçuvi, Vila Medeiros, Tremembé e parte do município de Guarulhos, apresentarem índices moderado baixo variando entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Em área que abrange os postos de monitoramento (CETESB) do Jaraguá e o posto de monitoramento (CGE) de Perus, abrangendo parte dos distritos de Anhanguera, Perus e Jaraguá, apontaram índices moderado entre 75 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para os demais distritos, os mesmos também apresentaram índices moderados, no entanto que variam entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

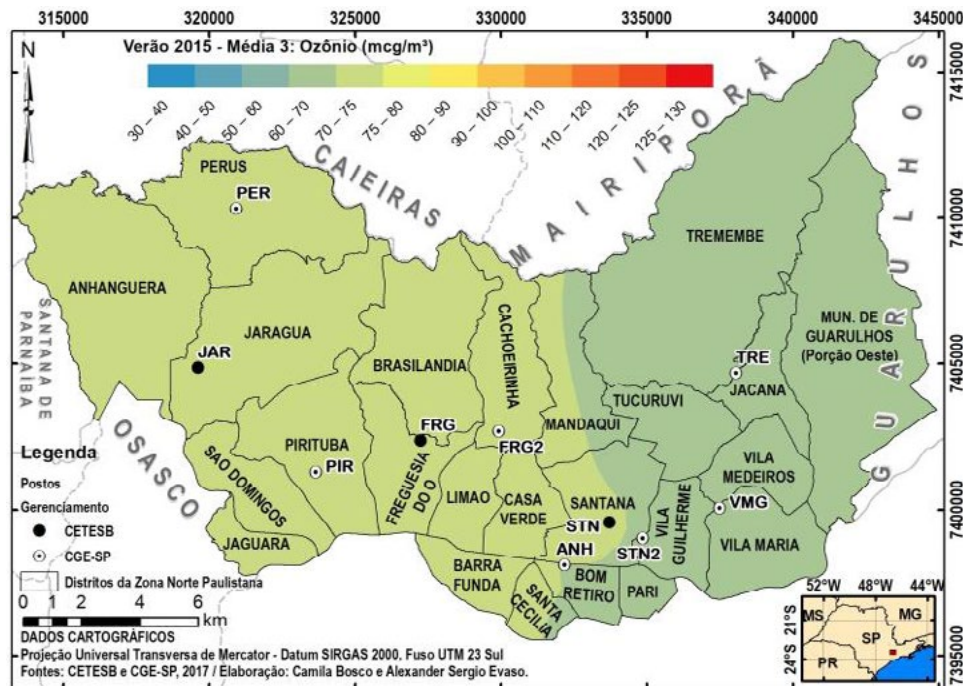


Figura 19.

Média 03 (21/02 a 20/03) do Verão de 2015.

No mapa representando os índices de ozônio poluente ao final do verão de 2015 observamos uma divisão, onde abrange o município de Guarulhos e os distritos de Tremembé, até parte do Mandaqui e Santana, onde apresentaram os índices moderado baixo, entre 60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Já a outra porção da região norte da cidade de São Paulo, que inclui parte dos distritos de Santana e Mandaqui até o distrito o distrito de Anhanguera, estes apontaram o índice moderado entre 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

DISCUSSÃO

INVERNO DE 2013 A 2015

Fundamentando-se no que foi apresentado nos mapas, o início do inverno nos anos de 2013, 2014 e 2015, possuem comportamentos semelhantes, pois apresentam índices bons (30 a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) em toda a região norte da cidade São Paulo. No entanto, algumas regiões nos anos de 2014 e 2015 apresentaram o índice moderado baixo (50 a $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de ozônio poluente.

No meio do inverno, observamos que os anos de 2014 e 2015 obtiveram o mesmo comportamento em relação ao índice de ozônio poluente, categorizado como moderado baixo (50 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) em toda a região norte. Contudo em 2015, este índice obteve um aumento, passando a ser categorizado como índice moderado (60 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). O distrito da Anhanguera neste mesmo período, também foi categorizado como moderado, no entanto com o índice de ozônio poluente variando em 70 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ao final do inverno nestes anos, observamos o aumento explícito dos índices do ozônio poluente. Considerando que no início da estação tínhamos índices bons e ao final da estação observamos níveis ruins (80 a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) à moderado (75 a $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), na região que abrangem os distritos de Anhanguera e Perus até o distrito da Brasilândia. Contudo mais ao leste observamos os índices moderado (70 a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e moderado baixo (60 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do distrito do Cachoerinha até o distrito de Tremembé.

VERÃO ENTRE 2013 A 2015

Analisando o comportamento dos mapas no início do verão, identificamos o aumento gradativo dos índices de ozônio poluente neste período ao passar dos anos. Em 2013, as maiores partes da região norte apresentaram índices moderado baixo (60 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e moderado (70 a $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de ozônio poluente. Em 2014 as áreas que apresentavam índices moderado baixo (60 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$), diminuíram e a maior parte da região norte apresentaram os índices muito ruins (90 a $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de ozônio poluente.

No meio do verão destes anos, apenas em 2014 os índices de ozônio poluente se mantiveram em alta, indicando índices ruins (80 a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) até péssimos maiores de $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Os demais anos apresentaram índices moderado baixo (50 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e moderado 70 a $80 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ de ozônio poluente.

Ao final do verão, o ano 2014 permaneceu sendo o ano com maior índice de ozônio poluente indicando índices ruins (80 a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Os outros anos mantiveram os índices moderado baixo (50 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) moderado 70 a $80 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ de ozônio poluente.

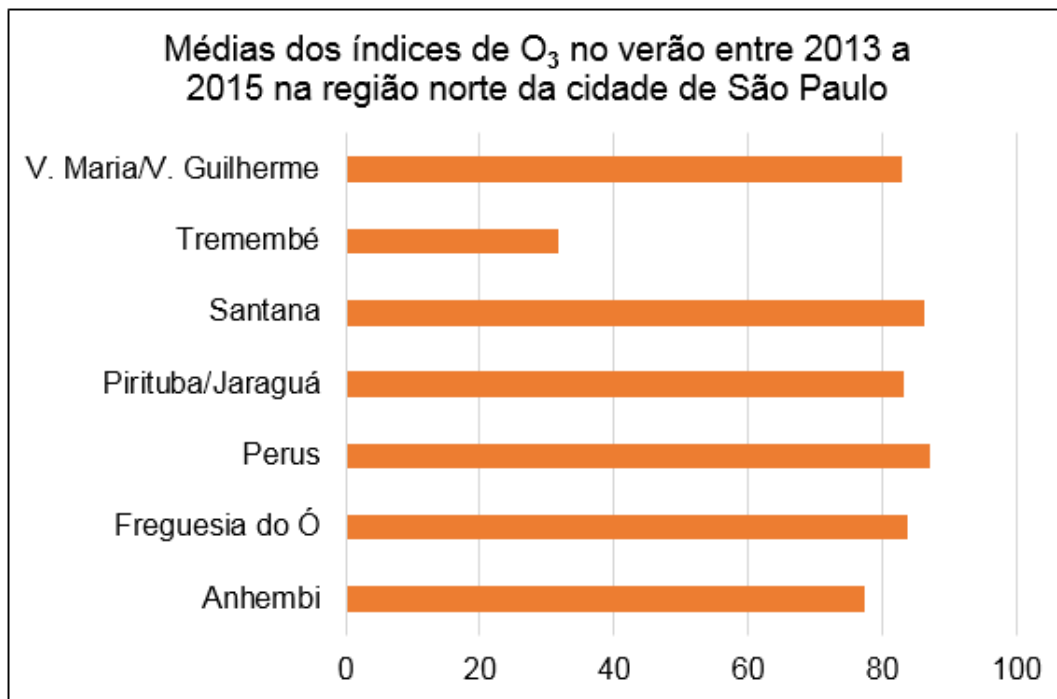


Figura 20.

Médias de ozônio poluente na região norte da cidade de SP no verão de 2013 a 2015.

Analisando o gráfico acima, que nos mostra as médias do ozônio poluente nos anos de 2013 a 2015 na estação mais quente do ano, o verão. Verificamos o alto índices de ozônio poluente mais acentuadas nas regiões próximas aos postos de Santana e Perus, com médias maiores que $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente. Em seguida, temos as áreas próximas aos postos da Freguesia do Ó, Pirituba/Jaraguá e Vila Maria e Vila Guilherme.

Para a região dos distritos de Santana e Perus, foi possível observar muitas vezes nos mapas, que próximo aos postos do Centro de Gerenciamento de Emergência – CGE desta região, os índices de ozônio poluente pendiam à serem maiores do que o restante do distrito, reforçando a correlação direta da temperatura com a formação do ozônio poluente, com isso a ideia dos microclimas.

Na região do distrito de Perus em especial, que possui influência direta com o distrito de Anhanguera e Jaraguá, que independente da estação do ano que se passava, áreas dos distritos sempre atingiam níveis de ozônio poluente maiores, mesmo que todas as regiões nortes estivessem apresentando índices moderado do poluente.

Nas regiões dos distritos de Freguesia do Ó, Vila Maria/Vila Guilherme e Pirituba/Jaraguá, estes apresentaram médias semelhantes, no entanto maiores que $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio poluente.

O gráfico a seguir, nos mostra as médias do ozônio poluente no período do inverno entre os anos de 2013 a 2015.

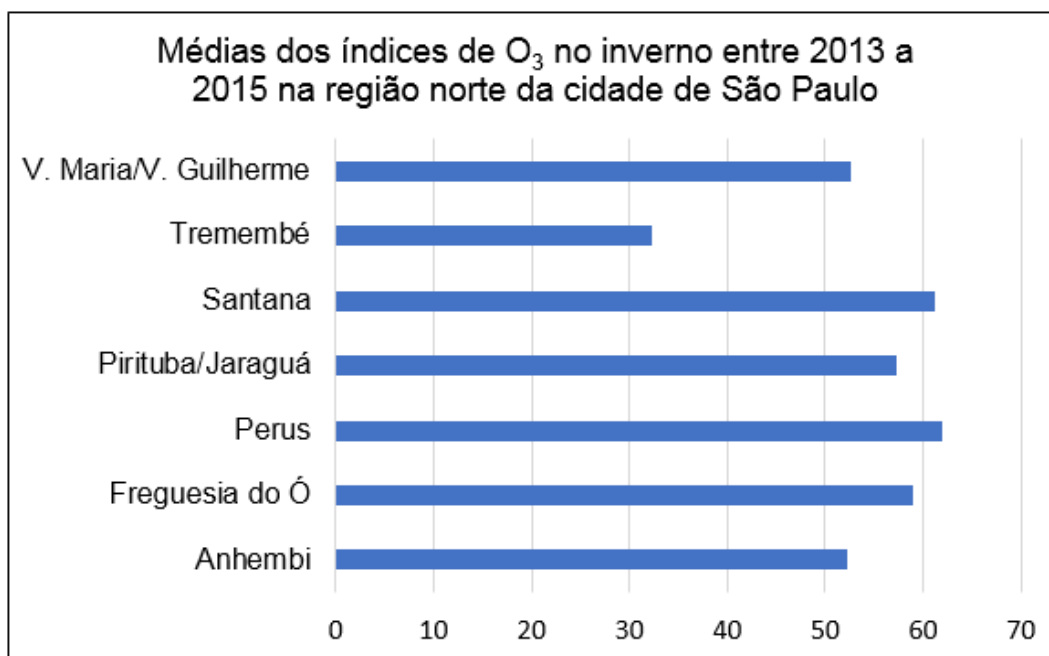


Figura 21.

Médias de ozônio poluente na região norte da cidade de SP no inverno de 2013 a 2015.

Os distritos de Santana e Perus seguem com os maiores índices, cerca de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozônio, seguido dos distritos de Vila Maria/Vila Guilherme, Pirituba/Jaraguá e Freguesia do Ó, em torno de $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de índice para ozônio poluente.

Para estas regiões as médias das temperaturas no período não superam os 23°C , considerando a temperatura baixa, outros fatores devem ser analisados, como fora citado, os óxidos de nitrogênio (NO) e os compostos orgânicos voláteis (COVs), ambos emitidos na forma antropogênica pela combustão dos automotores.

Estes distritos de Santana, Vila Maria/Vila Guilherme, Pirituba/Jaraguá e Freguesia do Ó, tiveram e ainda estão em expansão imobiliária. No caso das áreas de Vila Maria e Vila Guilherme, devido aos resquícios de áreas industriais não aproveitadas. A região de Santana por conta do Metrô e todo centro de comércio e serviços que se instalou na região. O distrito da Freguesia do Ó, por conta do projeto da linha 6 – Laranja do Metrô, que irá ligar a região da Brasilândia até o centro da cidade de São Paulo.

Todo este crescimento possui impacto na poluição atmosférica das regiões, principalmente por veículos automotores, pois são fontes diretas do óxido de nitrogênio (NO) e dos compostos orgânicos voláteis (COVs), precursores do ozônio poluente.

Segundo dados do Departamento de Transito do Estado de São Paulo – DETRAN, em janeiro de 2013 a cidade de São Paulo possuía cerca de 43.509 ônibus e 5.324.926 automóveis rodando da cidade. Em dezembro de 2015, este número sobe para 45.861 ônibus e 5.789.830 veículos transitando pela cidade de São Paulo.

Um aumento de 5,1% na frota de ônibus e de 8% na frota veicular, considerando que a renovação total da frota dos ônibus na cidade de São Paulo, se dará apenas daqui a 20 anos, de acordo com a nova licitação do ônibus, e que pouquíssimos veículos na cidade transitam com combustíveis menos poluentes, ainda teremos aumento do lançamento destes precursores do ozônio poluente na troposfera.

Para os distritos de Perus, Anhanguera e Jaraguá, que apresentaram picos altos para o ozônio poluentes, tanto no inverno quanto no verão, podemos apontar como um fator, as obras de infraestrutura do Rodoanel – Trecho Norte, pois acarreta muitos impactos negativos para a região nesta fase de implantação do projeto.

Nos dois gráficos apresentados, o distrito de Tremembé e toda a região leste, foram as que apresentaram os índices menores de ozônio troposférico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa visou expor da problemática do ozônio poluente (O_3) e por meio da elaboração da equação ajustada entre temperatura e ozônio, baseado dos nos dados fornecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB e pelo Centro de

Gerenciamento de Emergência – CGE, predizer o poluente em regiões que não há o posto de monitoramento da CETESB, regiões estas como Tremembé, Perus, Vila Maria e Vila Guilherme.

Resultado da aplicação desta equação ajustada, por meio dos mapas gerados no ArcGIS 10.4 (ESRI®) pelo módulo do *Geostatistical Analyst* com o método da krigagem, foi a percepção de uma evolução gradativa dos índices de ozônio poluente na região norte da cidade de São Paulo, onde mais ao leste no distrito do Tremembé, chegaram a constar níveis moderado baixo ou apenas moderado de ozônio, no entanto quando analisamos a partir do distrito de Santana até o distrito da Brasilândia, os índices ficam mais altos, entre moderado até o ruim. Quando chegamos mais próximo da região dos distritos de Jaraguá, Perus e Anhanguera os índices chegam a indicar até o nível péssimo do poluente.

Foi possível visualizar em alguns mapas, o índice de ozônio poluente mais alto próximo as áreas do posto de monitoramento do Centro de Gerenciamento de Emergência – CGE, podendo relacionar a temperatura da região com o auxílio dos precursores, a formação do ozônio poluente, ressaltando a importância dos microclimas das regiões.

Concluimos que apesar da boa visualização dos índices de ozônio poluente, com base na equação ajustada entre temperatura e ozônio, para predizer o poluente em regiões que não há um posto de monitoramento. Existe a necessidade dos postos fixos da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, principalmente na região do distrito de Anhanguera, Brasilândia e no extremo do distrito do Tremembé, pois são áreas que possui grande adensamento urbano e passam por constantes mudanças em sua infraestrutura.

REFERÊNCIAS

ALVIM, DEBORA S., GATTI, L. V, SANTOS, H.M, ; Yamazaki, A, **Estudo dos compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio na cidade de São Paulo**, Studies of the volátil e organic compounds precursors of ozone in São Paulo city, Artigo Técnico, Eng. Sanit. Ambient. vol.16 no.2, 189-196, Rio de Janeiro Apr./June 2011.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, **Abrangência Espacial das Estações de Monitoramento de Ozônio (referente ao item I do Artigo 14º do Decreto Estadual nº 59.113/2013)**. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2013/12/relatorio-GTO3.pdf>> Acesso em março de 2017.

FREITAS, E. D. et.al. **A simple photochemical module implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the metropolitan area of São Paulo, Brazil: Coupling and validation**. Atmospheric Environment. Vol. 39, p; 6352-6361. 2005.

MELO, TADEU C, LOUREIRO, LUCIANA N, VICENTINI, P. C., MOREIRA, E, ALMEIDA, J, C. **Fator de Reatividade dos Gases de Escapamento para Formação de Ozônio – Metodologia e Resultados de Veículos Nacionais com Gasolina e GNV**. p. 569-574.

In: **In Anais do XXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva — SIMEA 2013**. São Paulo. Blucher, 2014. ISSN 2357-7592, DOI 10.5151/engpro-simea-PAP81.

MINISTÉRIO DA SAÚDE – Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Poluição Atmosférica – VIGIAR. **Instrumento de Identificação dos Municípios de Risco, IIMR, 2012. Situação dos Estados Brasileiros**. Brasília. 2013.

NEVES, NEUZA. **Formação e Dispersão de Ozônio na Região do Recôncavo Baiano**, Salvador, 2010.

NOVAIS, D. L. V. **Ozônio: Aliado e Inimigo**. São Paulo: Spicione, 1998.

SÃO PAULO, Decreto nº 59.113, de 23 de abril de 2013. **Estabelece novos padrões de qualidade do ar e das providências correlatas**, Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, São Paulo, 2013.

Recebido em: 18/05/2018

Aceito em: 30/05/2018