



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

-TDI

**ESTUDO DE QUALIDADE DO AR NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ):
ANÁLISE DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO E VALIDAÇÃO
DO MODELO BRAMS PARA O PERÍODO DOS JOGOS
OLÍMPICOS DO RIO DE JANEIRO**

Igor Frassoni Guedes dos Santos

Relatório Final de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE) orientado por Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (INPE)

URL do documento original:

<http://urlib.net/xx/yy>

23/07/2018



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

-TDI

**ESTUDO DE QUALIDADE DO AR NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ):
ANÁLISE DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO E VALIDAÇÃO
DO MODELO BRAMS PARA O PERÍODO DOS JOGOS
OLÍMPICOS DO RIO DE JANEIRO**

Igor Frassoni Guedes dos Santos

Relatório Final de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE) orientado por Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (INPE)

URL do documento original:

[<http://urlib.net/xx/yy>](http://urlib.net/xx/yy)

23/07/2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

ESTUDO DE QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ): ANÁLISE DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO E VALIDAÇÃO DO MODELO BRAMS PARA O PERÍODO DOS JOGOS OLÍMPICOS DO RIO DE JANEIRO / Igor Frassoni Guedes dos Santos. – : , 23/07/2018.

p. ; (-TDI)

() – , , .

: .

CDU



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Informar aqui sobre marca registrada (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar as previsões de ozônio do modelo Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) realizadas operacionalmente em alta resolução espacial (1km) pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) durante os Jogos Olímpicos e Paralímpicos de 2016 ocorrido na cidade do Rio de Janeiro. Para isso, foram utilizados dados observados dos poluentes ozônio, compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio de seis estações de monitoramento, fornecidos pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente da cidade do Rio de Janeiro (SMAC) a partir do programa MonitorAR-Rio (Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar). Foi realizado o cálculo do viés médio das previsões horárias do modelo com prazo de previsão de até 48h do período de agosto e setembro de 2016. Os resultados obtidos indicaram que o modelo tende a subestimar as concentrações de ozônio, especialmente no período da madrugada e início da manhã, quando ocorre um máximo secundário do poluente. Tendo em vista que o ozônio é um poluente secundário, foi necessário investigar o comportamento dos seus precursores. Dados observados de óxidos de nitrogênio foram analisados de maneira a subsidiar o entendimento do comportamento dos precursores do ozônio para posterior análise das previsões do modelo. Verificou-se que há uma relação oposta entre o comportamento diurno do ozônio e dos óxidos de nitrogênio. Quando se tem máximos de ozônio, observam-se mínimos do outro poluente. Além disso, observou-se que na média, os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) não foram ultrapassados durante o período dos jogos Olímpicos. A próxima etapa do trabalho será analisar, por meio de técnicas estatísticas, se o modelo prevê de forma satisfatória o comportamento observado dos óxidos de nitrogênio nas estações analisadas.

Palavras-chave: Ozônio. RMRJ. BRAMS. Poluição. Atmosférica.. RMRJ. Precipitação. Correlação. AOD.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

O ₂	–	Oxigênio
O ₃	–	Ozônio
NO _x	–	Óxidos de Nitrogênio
COVs	–	Compostos Orgânicos Voláteis
RMRJ	–	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSP	–	Região Metropolitana de São Paulo
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
CPTEC	–	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CETESB	–	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	–	Intergovernmental Panel on Climate Change
CONAMA	–	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSU-EUA	–	California State University
SMAC	–	Secretaria Municipal do Meio Ambiente da cidade do Rio de Janeiro
BRAMS	–	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Ozônio	3
2.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	3
2.3 Compostos Orgânicos Voláteis	4
2.4 Formação do Ozônio na Troposfera	4
2.5 Índices de Qualidade do Ar	5
3 Dados	9
3.1 Dados do modelo BRAMS	9
3.2 Dados Observacionais da Área de Estudo	9
4 Metodologia	11
4.1 Revisão do ambiente computacional	11
4.1.1 Linguagem de Programação Python	11
4.2 Análise dos dados de concentrações de poluentes observados e previstos .	11
5 Resultados	15
6 Conclusão	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1 Introdução

Após a revolução industrial, no fim do século XVIII, e com maior intensidade no século XX, os impactos causados pela ação antrópica no meio ambiente tornaram-se mais significativos, em conformidade ao crescimento populacional e também ao consumismo pessoal, principalmente nos países desenvolvidos (GOMIDES et al., 2009). Dentre esses impactos, destacam-se aqueles relacionados à degradação do meio ambiente devido à emissão de poluentes atmosféricos.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, a poluição atmosférica pode ser definida como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança e à qualidade de vida da comunidade. Os danos podem ser causados diretamente pelos contaminantes (poluente primário) ou por suas diferentes combinações (poluente secundário).

Dentre os poluentes secundários, pode-se encontrar o ozônio (O_3) troposférico cujos principais precursores são os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs).

O O_3 é um gás presente a nível traço, encontrado em uma camada de aproximadamente 50km acima da superfície terrestre, que exerce uma grande importância na estratosfera. Ele protege os seres vivos a partir da absorção da radiação eletromagnética emitida pelo sol no comprimento de onda do ultravioleta (UV). Formado naturalmente a partir da fotodissociação do oxigênio atmosférico (O_2), esse processo absorve a radiação UV nos comprimentos de onda entre 0,1 microns e 0,2 microns. A fotólise do O_2 leva à formação de dois átomos de oxigênio (O). Este, altamente reativo, se combina rapidamente com uma molécula de O_2 para formar o O_3 . As moléculas de O_3 produzidas passam a absorver radiação UV entre 0,2 microns e 0,3 microns no processo de fotodissociação do O_3 na estratosfera, entre 20km a 60km de altura. Como as ligações na molécula de O_3 são mais fracas do que aquelas na molécula de O_2 , a fotólise é conseguida com fótons de mais baixa energia. Este processo explica como o O_3 age como um filtro para a radiação UV.

Na troposfera, o O_3 também é encontrado naturalmente em baixas concentrações (10-20ppbv), quando em equilíbrio com seus precursores. No entanto, a influência das atividades antrópicas vem alterando consideravelmente esse equilíbrio e também os níveis globais de concentração de fundo (MARTINS, 2006). Com o aumento da

quantidade de automóveis e indústrias no planeta, houve um crescimento na emissão de NOx e COVs. Uma vez que o O₃ é produzido mediante reações químicas entre estes dois compostos na presença de radiação solar, principalmente em áreas urbanas, industriais e em regiões propensas à estagnação de massas de ar (GOMIDES et al., 2009), houve um aumento de sua produção nos últimos anos.

O presente projeto tem como objetivo realizar uma análise das previsões de ozônio troposférico do modelo *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) sobre a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) referentes ao período dos Jogos Olímpicos de 2016. Para tanto, os dados obtidos a partir do modelo são comparados com dados observados fornecidos pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente da cidade do Rio de Janeiro (SMAC). Com esta análise, outro objetivo é validar a acurácia do modelo BRAMS em alta resolução para o período analisado.

2 Revisão Bibliográfica

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, a poluição atmosférica pode ser definida como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança e à qualidade de vida da comunidade. Esses danos podem ser causados diretamente pelos contaminantes (poluente primário) ou por suas diferentes combinações (poluente secundário).

Dentre os poluentes secundários, pode-se encontrar o ozônio troposférico (O_3) cujos principais precursores são os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os Compostos Orgânicos Voláteis (COV's). Esses gases, combinam-se quimicamente com o oxigênio para formar o O_3 .

2.1 Ozônio

O O_3 é um gás oxidante, que está presente na atmosfera ao nível traço, ou seja, é um dos gases que ocupa menos de 1% do volume da atmosfera terrestre. Ele é formado a aproximadamente 30 km de altitude, onde os raios solares incidentes (com comprimento de onda menor que 242 nm) dissociam a molécula de oxigênio (O_2). Formado naturalmente a partir da fotodissociação do O_2 , a nível estratosférico, o ozônio possui a função de filtrar os raios ultravioletas do sol. O mesmo gás é encontrado também na troposfera em baixas concentrações, quando está em equilíbrio com seus precursores. Entretanto, quando a atmosfera sofre alterações com relação aos seus gases, no caso, agentes poluidores, esse equilíbrio é perdido. Os níveis de ozônio na troposfera dependem de compostos orgânicos voláteis (COV's), do monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e da intensidade da radiação solar. Quando a quantidade de ozônio na troposfera se eleva, este, por ter caráter oxidante quando presente nessa altura da atmosfera, exerce diversos efeitos nocivos à saúde humana e ao ecossistema terrestre. Além do mais, é possível que o aumento o ozônio troposférico possa ter um impacto significativo na qualidade do ar e nas mudanças climáticas, visto que este é um dos gases do efeito estufa (HOUGHTON et al., 2001).

2.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Os gases conhecidos como NO_x são os formados durante os processos de combustão. Segundo a CETESB, os veículos são as principais fontes desses poluentes. O óxido

de nitrogênio (NO), se transforma em dióxido de nitrogênio (NO₂) sob a ação de luz solar, e este desempenha papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos como o ozônio. Dependendo das concentrações, o NO₂ causa prejuízos à saúde.

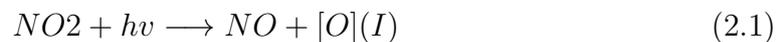
As concentrações de NO₂ diminuem, conforme as concentrações dos gases NO_x diminuem. (RUSSELL; MCCUE, 1998) mostrou em simulações para Los Angeles, que reduzindo as emissões de NO_x, também seriam reduzidos os picos de NO₂ bem como o ácido nítrico e aerossóis de nitrato, que formam o NO₂.

2.3 Compostos Orgânicos Voláteis

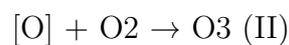
O termo Compostos Orgânicos Voláteis engloba um grande grupo de poluentes que se encontram presentes no ar atmosférico, principalmente, sob a forma gasosa (HOSHI et al., 2008). Segundo a CETESB, os COV's são gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e de outros produtos orgânicos, sendo emitidos pelos veículos, pelas indústrias, pelos processos de estocagem e transferência de combustível etc. Muitos dos gases que fazem parte desse grande grupo de poluentes podem ser considerados essenciais precedentes do O₃.

2.4 Formação do Ozônio na Troposfera

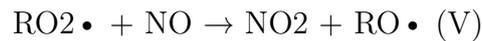
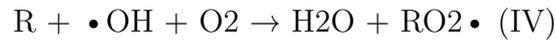
Como visto no relatório científico de TAMADA (2017), o ciclo do O₃ na troposfera ainda não é totalmente conhecido devido ao alto grau de complexidade dos fatores que envolvem a produção e consumo desse gás. Porém, o mecanismo de formação e as reações químicas que regem sua formação na baixa troposfera já são conhecidos. Como visto anteriormente, o O₃ é formado a partir da combinação de um átomo com uma molécula de oxigênio. Entretanto em altitudes mais baixas, a única fonte de oxigênio atômico é o NO₂, que é dissociado por um fóton (hv) de comprimento de onda entre 0,28 microm e 0,43 microm.



O oxigênio atômico produzido é rapidamente consumido, formando o ozônio, que por sua vez é degradado pelo óxido de nitrogênio.



Essas três reações estabelecem uma concentração estável do ozônio na troposfera, contudo, com a alta concentração de COVs, essencialmente os hidrocarbonetos, esse equilíbrio é prejudicado. Na presença desses compostos e de radicais hidroxila, o NO pode ser convertido a NO₂ sem consumir O₃, contribuindo para um acúmulo do poluente.



Os hidrocarbonetos (R) são atacados por radicais hidroxilas, formando radicais alquil peróxi (RO₂•), que por sua vez reagem com o monóxido de nitrogênio, produzindo assim, o dióxido de nitrogênio e um radical alcoxi. Esse radical gerado também pode contribuir para maiores concentrações de ozônio, visto que é precursor de um novo radical alcóxi e do hidro peróxido HO₂, ambos capazes de transformar NO em NO₂ da seguinte forma:



O radical hidroxila, principal composto oxidante do processo, possui três fontes principais na atmosfera.

- 1) Dissociação fotoquímica do ozônio
- 2) Dissociação fotoquímica de compostos carboxílicos
- 3) Dissociação fotoquímica do ácido nitroso

Analisando os mecanismos, observa-se que a formação do ozônio e de outras espécies secundárias não é instantânea (DALLAROSA, 2005). Além disso, o ozônio, devido a sua particular característica de formação, é altamente influenciado pelas condições de vento, temperatura, radiação e concentração de seus precursores. Em muitas regiões urbanas os maiores níveis de ozônio são observados relativamente afastados do grande centro urbano (SEINFELD, 1989).

2.5 Índices de Qualidade do Ar

Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro o Índice de Qualidade do Ar utilizado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) acompanha os padrões nacionais estabele-

cidos pela Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990.

Tabela 2.1 - Índice de Qualidade do Ar.

O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	
Classificação	Índice
Boa	0-80
Regular	81-160
Inadequada	161-200
Má	201-800
Péssima	>800

Fonte: Adaptado de CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990.

A escala do IQA para o O₃ apresentada na Tabela 3.1 é de $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ a $800\mu\text{g}/\text{m}^3$. Os valores de concentração são medidos a cada 1 hora e são considerados bons se encontram-se entre o intervalo de 0 a $80\mu\text{g}/\text{m}^3$, regulares entre 81 a $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ que $800\mu\text{g}/\text{m}^3$. A Tabela 3.2 indica o Índice Geral de Qualidade do Ar e suas implicações gerais á saúde da população.

Tabela 2.2 - Índice Geral de Qualidade do Ar e suas implicações gerais á saúde da população.

Qualidade	Riscos gerais à Saúde
Boa	Praticamente não há riscos à saúde.
Regular	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
Inadequada	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
Má	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
Péssima	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: INEA (2017).

3 Dados

3.1 Dados do modelo BRAMS

Os dados de concentração de ozônio previstos para o período estudado foram gerados a partir das previsões operacionais durante o período de estudo a partir do modelo BRAMS versão 5.2, em 1km de espaçamento horizontal, com resolução temporal de uma hora. O BRAMS é modelo numérico desenvolvido para a previsão de tempo e qualidade do ar em escala regional com diversas funcionalidades específicas para prever os padrões de circulação e concentração da atmosfera sobre a América do Sul (BRAMS, 2017). Baseado no Sistema Regional de Modelagem Atmosférica (RAMS) originalmente desenvolvido na CSU-EUA, o software BRAMS está sob uma licença gratuita (CC-GPL). Atualmente, é desenvolvido e mantido pelo CPTEC-INPE, USP e outras instituições no Brasil e no exterior (CPTEC, 2017).

Durante os jogos olímpicos, o CPTEC/INPE produziu previsões operacionais uma vez por dia, a partir do horário das 00:00 UTC por até dois dias. Desta forma, foram produzidas previsões de 24 horas e de 48 horas. Além da previsão de ozônio, o sistema de previsão de qualidade do ar desenvolvido disponibilizou previsões de material particulado com diâmetro menor do que 2,5 microns, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, óxidos de nitrogênio e material particulado integrado na coluna. Estas previsões foram disponibilizadas no sítio do CPTEC, juntamente com as previsões de circulação atmosférica, como vento a 10 metros, temperatura e umidade do ar a 2 metros, pressão atmosférica ao nível do mar e precipitação acumulada a cada hora.

3.2 Dados Observacionais da Área de Estudo

Os dados de concentrações de ozônio observadas na RMRJ foram disponibilizados pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente do Rio de Janeiro por meio do programa MonitorAr-Rio. Foram coletados dados de seis estações de monitoramento localizadas nos bairros Bangu, Campo Grande, Centro, Copacabana, Irajá e Tijuca durante o período analisado. Em 2008, a prefeitura do Rio de Janeiro e a Petrobras firmaram um convênio para implantação do Programa MonitorAr-Rio cujo objetivo foi restabelecer a operação da rede municipal de monitoramento de qualidade do ar. Além da reativação da coleta de dados, o convênio entre as duas entidades contemplou a ampliação do serviço com a aquisição de quatro novas estações fixas, assim como a complementação das antigas estações, pelo investimento em sensores meteorológicos e analisadores de ozônio (SMAC, 2017).

4 Metodologia

Para o desenvolvimento desse trabalho, algumas etapas foram seguidas, como uma revisão dos comandos utilizados no ambiente computacional Linux, a utilização de scripts nesse ambiente e a introdução do bolsista à uma nova linguagem de programação, o Python. A seguir, encontram-se uma breve discussão sobre esses itens.

4.1 Revisão do ambiente computacional

Como o bolsista havia perdido o contato com o ambiente computacional, inicialmente foi necessária ser feita uma revisão dos comandos básicos para que o mesmo conseguisse realizar suas atividades. Basicamente, essa etapa foi concluída em uma manhã de trabalho, onde o bolsista foi capaz de relembrar alguns comandos necessários.

4.1.1 Linguagem de Programação Python

Para a leitura e cálculo de índices estatísticos, foi utilizada essa linguagem de programação, visto que a mesma apresenta diversos fatores que aumentam a produtividade, além disso, o Python é multiplataforma e o seu uso vem crescendo no meio acadêmico internacional. Por se tratar de uma linguagem difundida internacionalmente, já existem diversas bibliotecas que podem ser utilizadas com essa linguagem, como leitura de dados e impressão de gráficos, ferramentas matemáticas, entre outros.

A linguagem de programação Python foi escolhida para realizar a criação de gráficos e calcular os índices estatísticos. Essa linguagem foi escolhida devido ao seu crescente número de usuários no meio acadêmico e científico, onde se mostra rápida e eficaz. O bolsista já possuía conhecimentos em outras linguagens de programação, assim, o contato com essa nova linguagem não foi tão difícil. De certa forma, o contato inicial se dá para conhecer o ambiente e os comandos diferentes que existem na linguagem, porém é claro, que rotinas mais elaboradas necessitariam de um tempo maior para o estudo e aperfeiçoamento do meio de programação.

4.2 Análise dos dados de concentrações de poluentes observados e previstos

A partir dos dados disponibilizados pelo programa MonitorAR-Rio, obteve-se as concentrações de ozônio e dos outros compostos analisados, medidas de 1 de agosto a 30 de setembro em intervalos de 10 minutos. Entretanto, alguns horários apresentavam ausência de dados. Assim, viu-se a necessidade de fazer um tratamento nos

dados. Este tratamento constituiu na criação de uma rotina computacional capaz de tornar esses espaços vazios em valores indefinidos, de modo que esses valores não sejam considerados nos futuros usos. Apesar da ausência de dados em alguns horários, o impacto não foi tão significativo, uma vez que a frequência de dados é grande, não sendo prejudicial para a análise dos gráficos gerados. Após concluir o tratamento dos dados, foram gerados scripts a fim de se obter os ciclos diurnos médios de cada estação de monitoramento.

O Ciclo diurno médio foi escolhido para realizar essa análise, pois o mesmo possibilita a observação do comportamento padrão das concentrações dos compostos analisados durante cada hora do dia. Assim, o diagnóstico do desempenho do modelo BRAMS se tornaria mais facilmente analisado.

Com os dados de ciclo diurno médio prontos, o bolsista iniciou o desenvolvimento de scripts em Python para a geração de gráficos. Foram gerados gráficos do ciclo diurno de todos os compostos analisados neste trabalho, dentre os quais: Monóxido de nitrogênio, dióxido de Nitrogênio, ozônio, óxidos de nitrogênio e o metano.

Para realizar o estudo dos erros sistemáticos do modelo BRAMS, foi realizado o cálculo do viés para cada hora do dia no ciclo diurno.

$$\text{Viés} = \text{Valor médio Previsto no horário} - \text{Valor médio Observado no horário}$$

O viés é obtido a partir da diferença de um valor médio de um determinado estimador estatístico (valores no ciclo diurno dos dados estimados) e o valor que se pretende estimar (valores no ciclo diurno dos dados observados). Desta forma, com o cálculo do viés obteve-se os valores dos erros sistemáticos cometidos pelo modelo em cada horário do ciclo diurno. Para verificar se a tendência geral do modelo é de subestimar ou superestimar as concentrações do ozônio, calculou-se o desvio viés.

$$\text{DesvioViés} = \sum_{t=1}^N \frac{\text{ValorPrevisto} - \text{ValorObservado}}{N}$$

O desvio viés é determinado pela somatória dos valores de viés dividido pelo número de valores somados (N). Caso o resultado obtido seja negativo, a análise mostra que, em geral, o modelo subestimou as concentrações dos compostos naquele período, e se o valor do desvio viés for positivo, o modelo superestimou essas concentrações.

Em ambos os casos, tanto para o cálculo do viés como do desvio viés, os resultados mais favoráveis são aqueles que mais se aproximam do valor zero, pois significam um menor erro cometido nas previsões.

A partir dos dados brutos disponibilizados pela SMAC, o bolsista realizou o processo de separação dos mesmos, a fim de utilizá-los posteriormente nos scripts que estão sendo desenvolvidos. Entre esses dados fornecidos, estão o dióxido de enxofre, o dióxido de nitrogênio, o monóxido de carbono, entre outros. Essa separação é feita a fim de facilitar o trabalho no momento de execução dos scripts, bem como tornar mais fácil a identificação dos dados.

Posteriormente foram gerados gráficos do ciclo diurno médio dos poluentes NO_x, COV's e O₃ a fim de realizar a comparação entre as concentrações médias destes poluentes e analisar suas relações.

5 Resultados

A análise das concentrações de ozônio em todas as estações de qualidade do ar da SMAC indicou que as concentrações do ozônio seguem um certo padrão. Geralmente, nas primeiras horas do dia os valores do poluente presente na troposfera começam a subir, chegando a um valor de máximo local entre as 02:00 e as 04:00. Logo em seguida, a quantidade de ozônio começa a decair, chegando a atingir as menores concentrações do dia, sendo que os menores valores são registrados entre os horários das 06:00 às 09:00 HL. Por volta das 10:00, as concentrações de ozônio voltam a subir rapidamente, formando um pico máximo entre os horários das 14:00 e das 16:00 HL, coincidindo com o período do dia com o máximo de insolação. Por fim, as concentrações do ozônio decrescem até os horários entre as 19:00 e 20:00, quando os valores do poluente se tornam mais estáveis.

Com exceção dos bairros Copacabana, Centro e Tijuca, o maior pico do ciclo diurno, formado entre os horários de maior incidência do sol, chega a atingir valores maiores que $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, perto do limite máximo de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ considerado para indicar a condição de ar saudável. Além disso, dessas três regiões que se destacam por possuir grandes concentrações de ozônio no período da tarde, duas delas, Bangu e Irajá apresentam valores que excedem a quantidade de ozônio desejável no ar. Em Bangu, esses dados são mais alarmantes, uma vez que as concentrações excedem o limite durante as 11:30 até as 18:00 HL. Ou seja, durante quase 5 horas, o ar respirado pelos habitantes de Bangu é classificado como regular, podendo causar tosse seca e cansaço na população mais sensível como crianças e idosos, segundo o INEA.

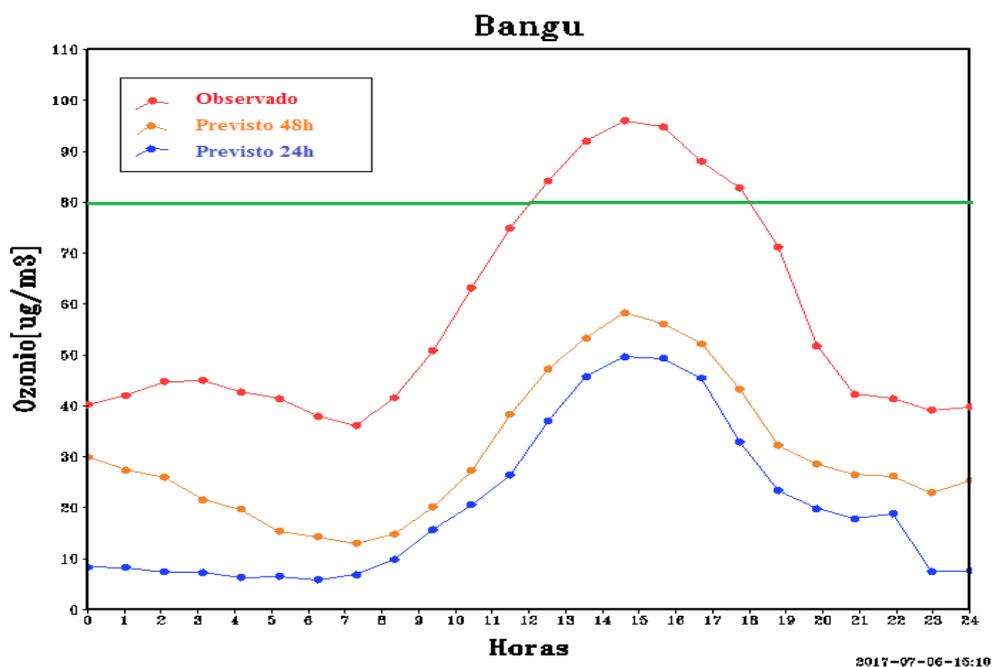


Figura 5.1 - Ciclo diurno médio das concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em Bangu, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A partir do cálculo do viés para a estação de Bangu, observa-se que em todos os horários o modelo subestimou os valores de ozônio (Figura 5.2). Obteve-se um viés médio negativo de $37,4855 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a previsão de 24 horas e $26,8297 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a previsão de 48 horas, concluindo-se que as previsões de 48 horas de antecedência apresentaram um viés médio menor.

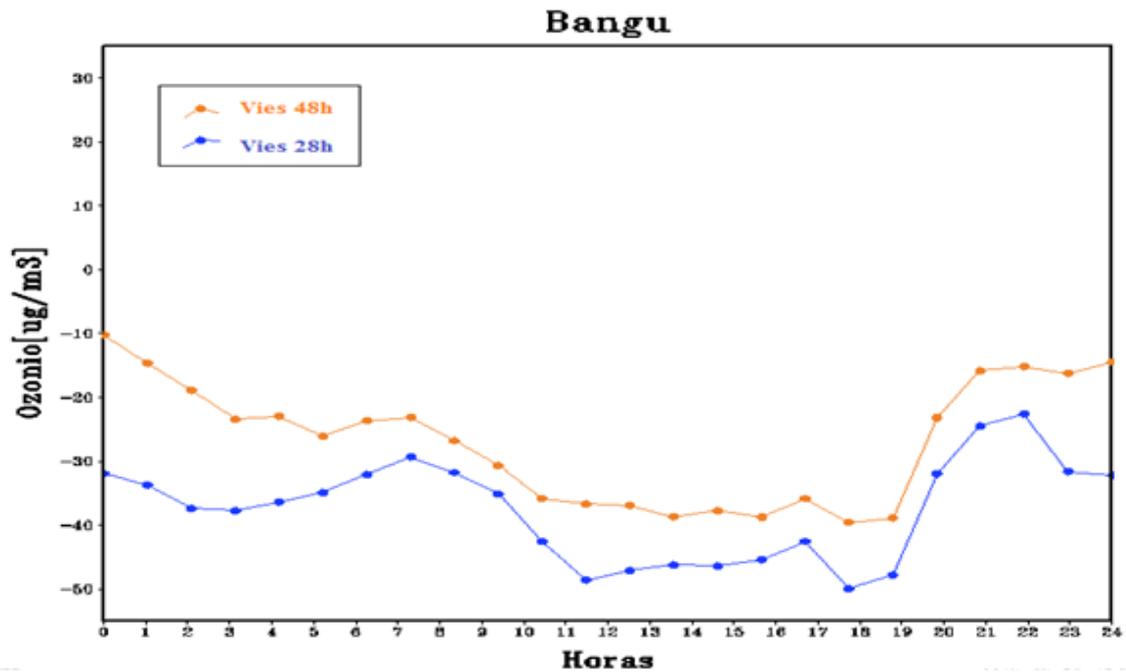


Figura 5.2 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas.

Comportamento similar foi encontrado para a estação de Campo Grande (Figura 5.3). Verificou-se que o modelo é capaz de prever com boa qualidade as concentrações de ozônio nos horários de pico máximo que ocorre entre os períodos de maior incidência de radiação solar. Porém, o modelo tem baixo desempenho durante o período noturno.

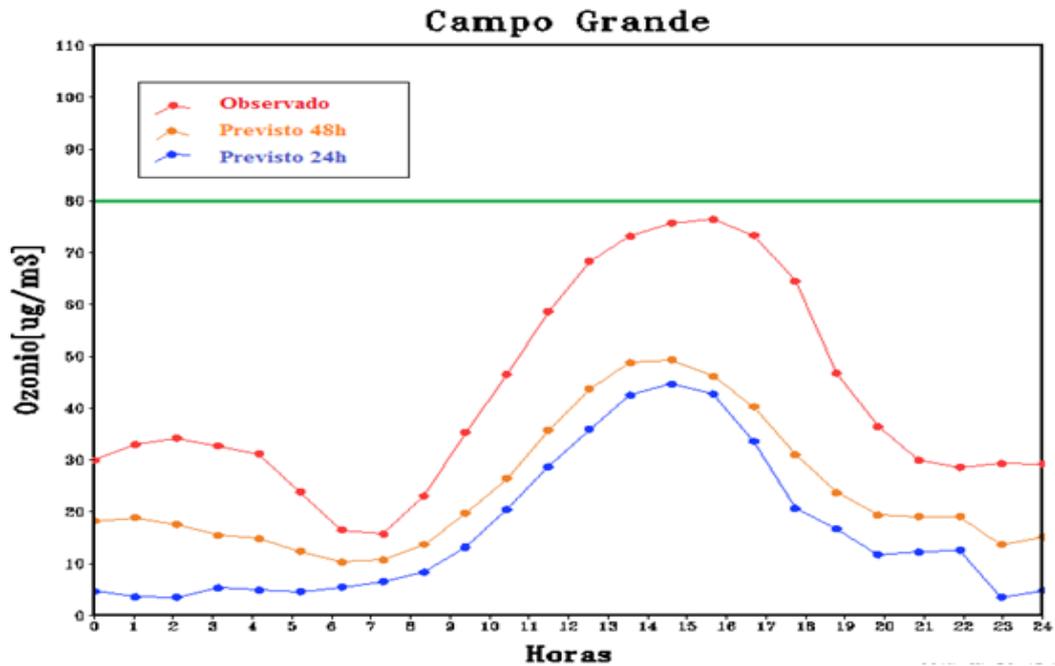


Figura 5.3 - Ciclo diurno médio das concentrações do ozônio em Campo Grande, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A Figura 5.4 indica que em todos os horários o modelo subestimou os valores de ozônio, porém entre as 06:00 e 08:00 da manhã o BRAMS tem melhor desempenho. Calculando o viés médio de Campo Grande, obteve-se valores negativos da ordem de 25,8876 para a previsão de 24 horas e 17,8854 para a previsão de 48 horas, concluindo-se novamente que as previsões de 48 horas têm menor erro.

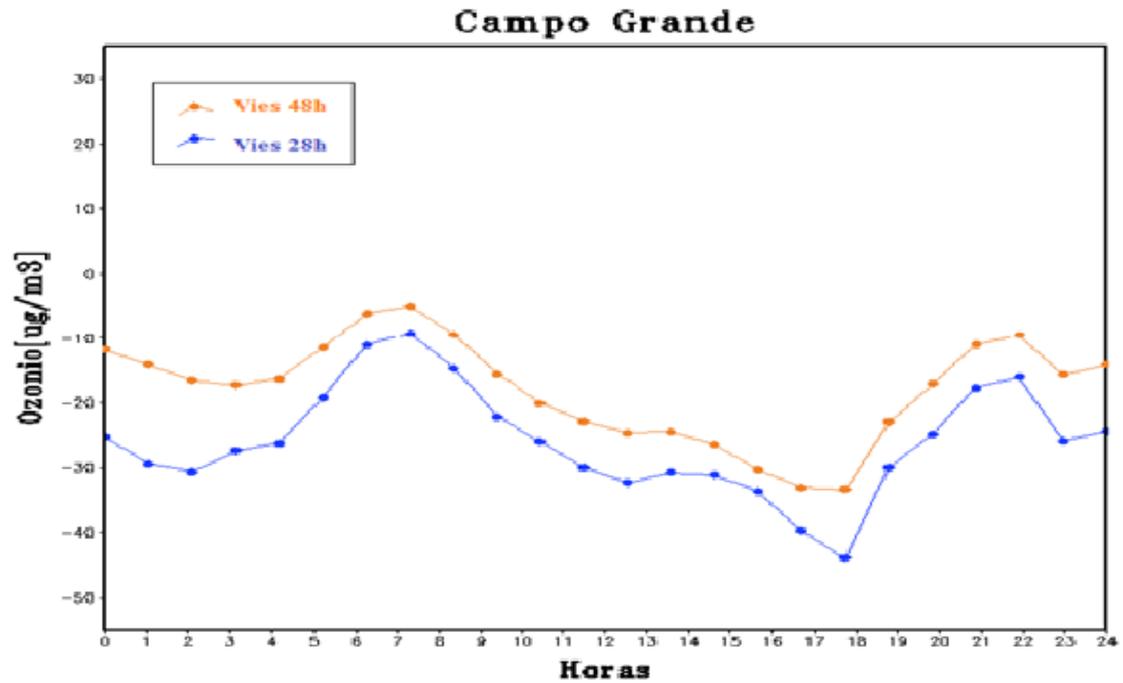


Figura 5.4 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para Campo Grande.

A Figura 5.5 indica que no bairro de Copacabana o modelo tem menor desempenho em acompanhar as oscilações das concentrações do ozônio, porém os valores previstos chegam a ser bem aproximados dos valores observados durante as primeiras horas do dia.

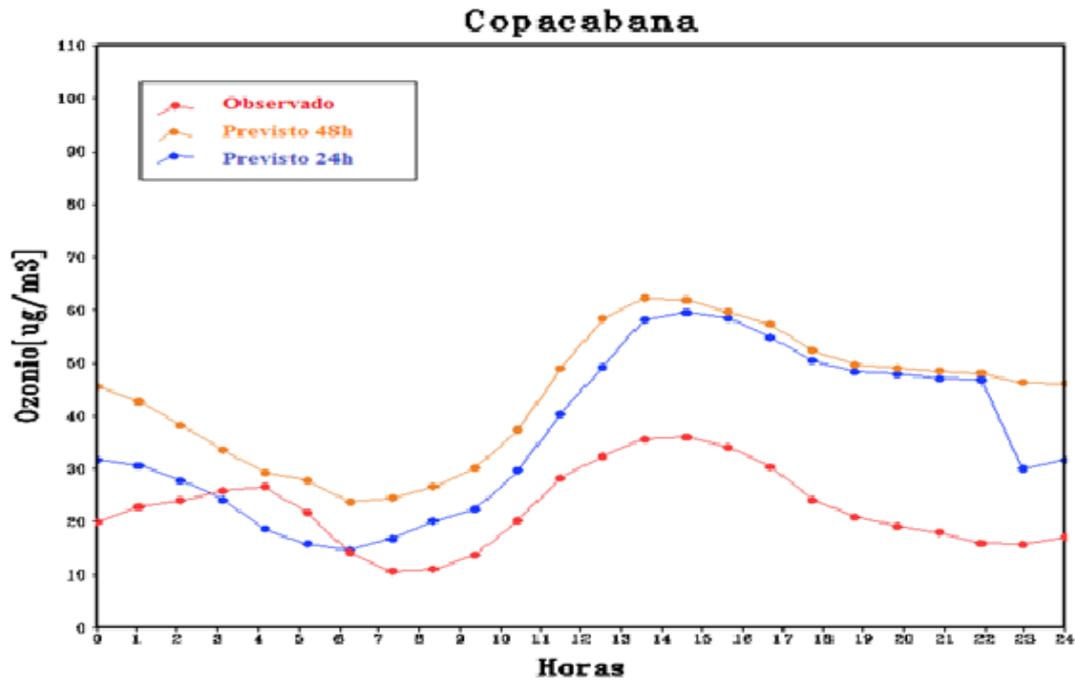


Figura 5.5 - Ciclo diurno médio das concentrações do ozônio em Copacabana, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A Figura 5.6 indica que as previsões do modelo são bem assertivas, principalmente nos horários das 03:00 e 06:00 da manhã nas previsões de 24 horas e no horário das 04:00 da manhã nas previsões de 48 horas. Calculando o viés médio de Copacabana, obteve-se valores positivos de 14,0384 para a previsão de 24 horas e 21,2401 para a previsão de 48 horas. Assim, os valores previstos a 24 horas foram mais assertivos.

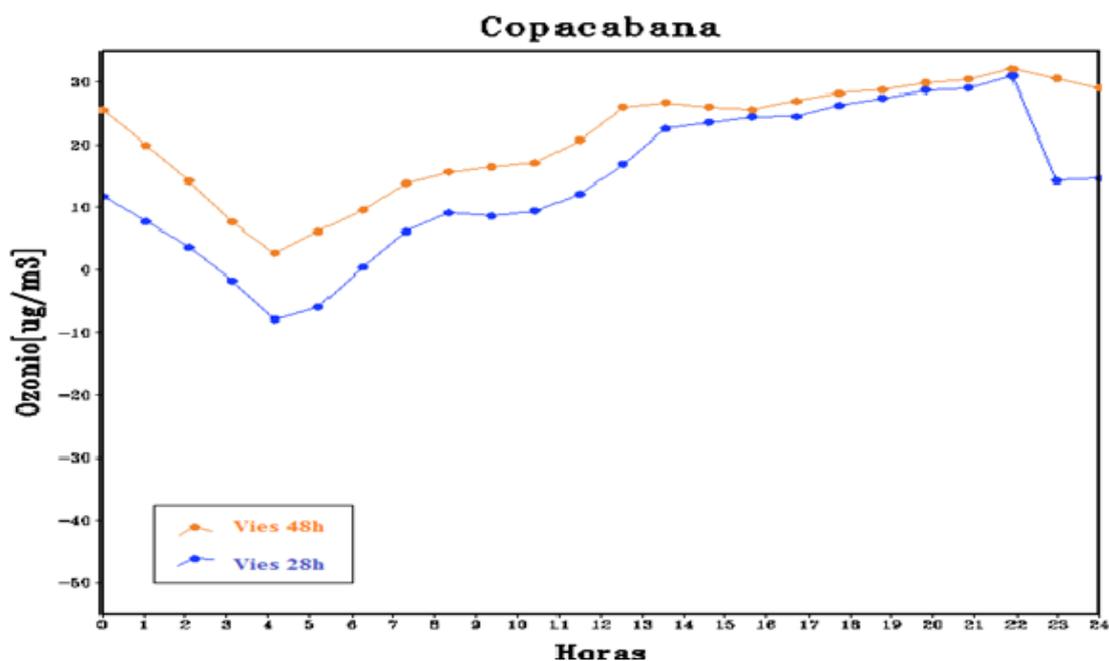


Figura 5.6 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas da estação de Copacabana.

Em relação às previsões do modelo BRAMS, observa-se que na maioria dos casos ele tende a subestimar as concentrações de ozônio, com exceção dos bairros Centro e Copacabana. Seu melhor desempenho ocorreu nas previsões de 24 horas e 48 horas do bairro Tijuca, enquanto seus piores prognósticos foram obtidos para o bairro Irajá. O modelo representa bem as concentrações de ozônio nos horários de pico máximo que ocorre entre os períodos de maior incidência de radiação solar. Contudo, nas primeiras horas do dia o BRAMS não consegue acompanhar as oscilações que causam um pequeno pico de ozônio na madrugada.

A partir da observação de que o modelo apresenta deficiências nas previsões de ozônio principalmente no período noturno, foi necessário analisar o comportamento de seus precursores. Foram gerados gráficos de concentração dos poluentes óxidos de nitrogênio compostos orgânicos voláteis ao decorrer de 24 horas. A figura 5.7 a seguir indica os valores de óxidos de nitrogênio, NO_x , nas quatro estações de estudo.

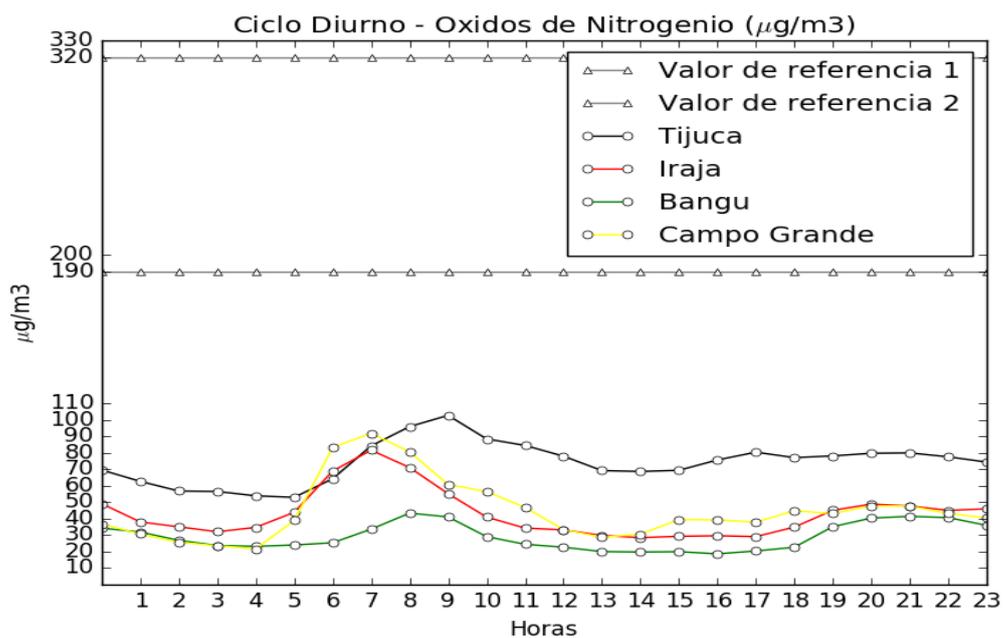


Figura 5.7 - Ciclo diurno médio das concentrações de óxidos de nirogênio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A Figura 5.8 apresenta os valores de ozônio para as quatro estações de monitoramento da qualidade do ar no Rio de Janeiro.

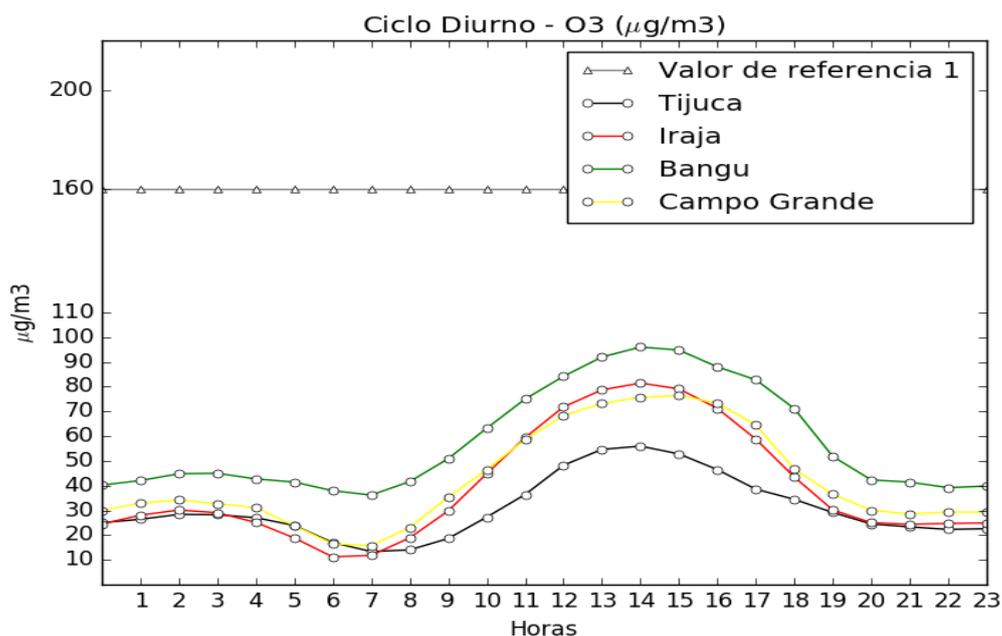
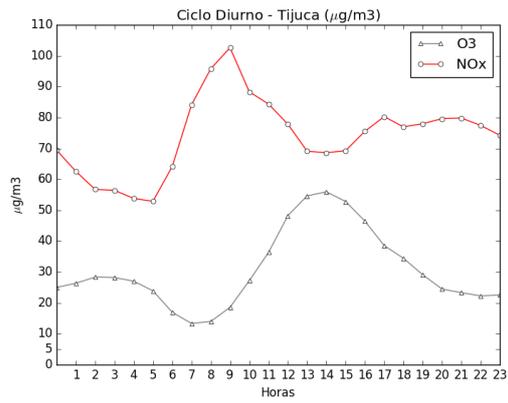
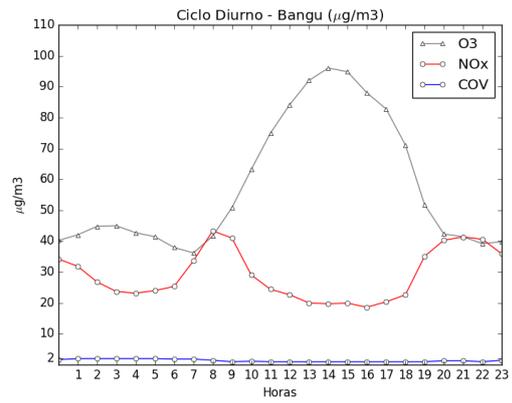


Figura 5.8 - Ciclo diurno médio das concentrações de ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

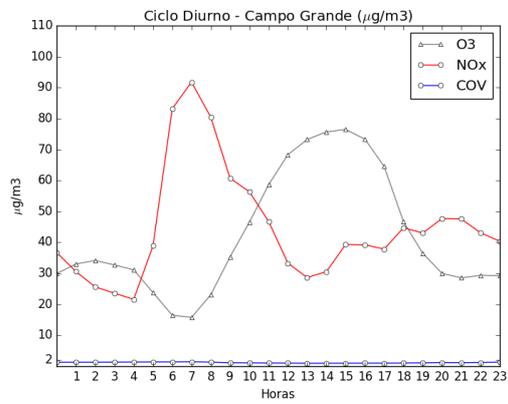
As curvas provenientes dos compostos de COV's, NO_x e do O_3 apresentam um comportamento oposto, como pode ser observado na Figura 5.9. Quando se tem valores máximos de O_3 , o valor correspondente no mesmo período de tempo para o NO_x é mínimo, e vice-versa. Isso pode ser explicado pela Equação 2.1, em que é mostrada a degradação do NO_2 (que está contido no NO_x) pela radiação solar, gerando o oxigênio atômico. Com a combinação deste com a molécula de oxigênio (O_2), ocorre a formação do ozônio. Essa característica é evidenciada em horários que se tem grande incidência de radiação solar, como das 12 às 16 horas, onde há um pico de O_3 na atmosfera. Na Figura 5.9b), correspondente à estação de Bangu, há um pico de NO_x às 8h, quando passa a decair até o mínimo que ocorre às 16h. Observa-se que a partir das 7h ocorre o crescimento da curva de concentração de ozônio, pois a incidência de radiação solar está aumentando. Nota-se também que a presença de COV's é muito baixa.



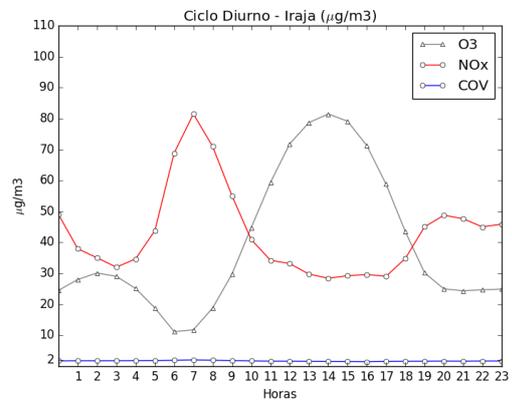
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.9 - Comparação entre as concentrações de NO_x e O_3 .

6 Conclusão

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro é uma região altamente populosa e industrializada. Devido a essas características, a poluição do ar é um fator a ser constantemente monitorado, uma vez que a região estudada é propensa a possuir más classificações no Índice de Qualidade do Ar proposto pelo Instituto Estadual do Ambiente. Essa preocupação com o caráter do ar foi intensificada no período dos Jogos Olímpicos e Paraolímpicos que ocorreram no Rio de Janeiro no ano de 2016. Nesse sentido, esse trabalho teve como um de seus objetivos a análise da qualidade do ar nos meses de agosto e setembro.

Com os dados obtidos verificou-se que, apesar do aumento significativo de pessoas na RMRJ nesses meses, o ar da região no que se refere a poluição causada pelo gás ozônio é classificada como boa, com algumas exceções nos bairros de Bangu e Irajá. Nesses dois bairros, apenas em Bangu o ozônio teve maiores chances de apresentar algum tipo de risco para a população mais sensível, uma vez que o tempo, em que as concentrações do poluente excederam o desejável, foi maior.

Então, verificou-se que com exceção de Bangu, os turistas, atletas e moradores do Rio de Janeiro estavam seguros contra os efeitos nocivos do ozônio troposférico. Contudo, o mesmo não pode ser afirmado para situações fora do analisado, uma vez que o período estudado engloba uma excepcionalidade, os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos. Devido ao evento, deve-se levar em consideração que a frota de veículos, uma das principais fontes de poluentes como os compostos orgânicos voláteis, foi totalmente alterada, provocando prováveis alterações nos horários de pico e valores absolutos nas concentrações de ozônio. Desse modo, para uma análise mais confiável sobre a qualidade do ar na RMRJ em condições normais, sugere-se um novo estudo observando diferentes períodos.

Em relação ao desempenho do modelo BRAMS, observa-se que em geral ele tem bom desempenho para prever o comportamento padrão do ozônio durante o período diurno, indicando corretamente os horários do pico máximo. Porém, há uma clara deficiência no modelo com relação à previsão das concentrações de ozônio no período noturno, especialmente o máximo local durante o período da madrugada. Ao mesmo tempo em que o modelo é capaz de prever com eficiência quando ocorrem os maiores picos de concentração, ele apresenta uma tendência de subestimativa dos valores absolutos.

Assim, conclui-se que o modelo BRAMS apresenta um bom desempenho, exceto nas

primeiras horas do dia.

Analisando somente as concentrações e o comportamento do ozônio é difícil identificar por que o modelo tende a subestimar as concentrações de ozônio, especialmente durante o período noturno. Isto porque a formação desse importante oxidante fotoquímico além de depender de fatores como a temperatura, radiação solar e vento, ela também é influenciada, de forma não linear, pelas concentrações de COVs e NOx. Assim, foi necessário o aprofundamento do estudo para identificar as deficiências do modelo BRAMS apontadas neste estudo. A primeira etapa desta nova fase consistiu na análise dos precursores COVs e NOx e seu comportamento em relação ao O₃. Verificou-se na análise dos dados observados que há uma relação oposta entre o comportamento diurno do ozônio e dos óxidos de nitrogênio. Quando se tem máximos de ozônio, observam-se mínimos do outro poluente. Com esta base, será possível em uma próxima etapa analisar a destreza do modelo em prever COVs e NOx, e assim possibilitar identificar se o modelo BRAMS possui deficiência na representação destes poluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAMS. 2017. Available from: <<http://brams.cptec.inpe.br/about/>>. Access in: 10 de Julho de 2017. 9

CPTEC. **CENTRO DE PREVISAO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMATICOS**. 2017. Available from: <<http://www.cptec.inpe.br/sobreocptec/pt>>. Access in: 15 de Julho de 2017. 9

DALLAROSA, J. B. **Estudo da formação e dispersão de ozônio troposférico em áreas de atividade de processamento de carvão aplicando modelos numéricos**. 2005. Available from: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/8475>>. Access in: 24 de janeiro de 2018. 5

GOMIDES, E.; DUTRA, F., F. E.; FERREIRA, F. D. **Emissão veicular e o ozônio troposférico na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 2009. Available from: <http://www.feam.br/images/stories/rafael/cibim_9_las_palmas-emissao_veiculares_-_oznio_29-aspectos_medio_ambientales.pdf>. Access in: 03 de julho de 2017. 1, 2

HOSHI, J.; AMANO, S.; SASAKI, Y.; KORENAGA, T. Investigation and estimation of emission sources of 54 volatile organic compounds in ambient air in Tokyo. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 10, p. 2383–2393, 2008. 4

HOUGHTON, J.; DING, Y.; GRIGGS, D.; NOGUER, M.; LINDEN, P. van der; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881p. Available from: <<http://webpages.icav.up.pt/PTDC/CVT/098487/2008/IPPC,%202001.pdf>>. Access in: 31 jan. 2018. 3

INEA. 2017. Available from: <http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_dimfis_gear/documents/document/zwew>. Access in: 1 de Julho de 2017. 7

MARTINS, L. **Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo**. 2006.

Available from: <http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_leila_d_martins_0.pdf>.
Access in: 30 de janeiro de 2018. 1

RUSSELL, A.; MCCUE, K. **Mathematical modeling of the formation of nitrogen-containing air pollutants. 2. Evaluation of the effect of emission controls.** Pittsburgh, Pennsylvania, 1998. Available from: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00168a004>>. Access in: 28 jan. 2018. 4

SEINFELD, J. H. Urban Air Pollution : State of Science. **Science**, v. 243, p. 745–752, 1989. 5

SMAC. **SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE.** 2017. Available from: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/monitorar-rio>>. Access in: 15 de Julho de 2017. 9

TAMADA, A. T. **ESTUDO DE QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ): ANÁLISE DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO E VALIDAÇÃO DO MODELO BRAMS PARA O PERÍODO DOS JOGOS OLÍMPICOS DO RIO DE JANEIRO.** Cachoeira Paulista, Brazil, 2017. 48 p. Access in: 27 dez. 2017. 4