

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

MARTA LUMA BATISTA SILVA

**ESTIMATIVA DA QUALIDADE DO AR NAS PRINCIPAIS ÁREAS
METROPOLITANAS DO NORDESTE BRASILEIRO.**

Maceió-AL

2021.

MARTA LUMA BATISTA SILVA

**ESTIMATIVA DA QUALIDADE DO AR NAS PRINCIPAIS ÁREAS
METROPOLITANAS DO NORDESTE BRASILEIRO.**

Dissertação apresentada ao corpo docente do curso de Pós-Graduação do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior

Co-Orientador: Prof. Dr. Roberto Fernando da Fonseca
Lyra

Maceió-AL

2021.

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586e Silva, Marta Luma Batista.
Estimativa da qualidade do ar nas principais áreas metropolitanas do nordeste brasileiro / Marta Luma Batista Silva. – 2021.
60 f. : il.

Orientador: Rosiberto Salustiano da Silva Junior.
Co-orientador: Roberto Fernando da Fonseca Lyra.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 57-60.

1. Modelo WRF/Chem. 2. Poluentes atmosféricos - Concentração. 3. Poluentes atmosféricos - Estimativa. 4. I. Título.

CDU: 551.508.95



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-183.

*“ESTIMATIVA DA QUALIDADE DO AR NAS PRINCIPAIS ÁREAS METROPOLITANA
DO NORDESTE BRASILEIRO.”*

Marta Luma Batista Silva

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior
(Orientador)

Prof. Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra
(Membro Interno)

Profa. Dra. Taciana Toledo de Almeida Albuquerque
(Membro Externo)

Prof. Dr. Sandro Correia de Holanda
(Membro Externo)

Setembro /2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela permissão de concretizar mais uma etapa.

Ao meu Orientador, Professor Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior, por aceitar o desafio e acreditar neste trabalho, e sempre ser solícito em todos os momentos que precisei.

Ao meu esposo que acompanha a minha caminhada desde a graduação e nunca me permitiu desistir.

Aos meus pais e irmãos por todo amor, cuidado e incentivo em todos os momentos.

Aos verdadeiros amigos que fiz na turma de 2019 durante o Programa de Pós-Graduação.

Aos grandes professores que tive o prazer de ter durante a Pós-Graduação, pelo acolhimento e os ensinamentos transmitidos.

RESUMO

A poluição atmosférica tem influência na qualidade do ar, que pode ser comprometida caso as substâncias emitidas devem estar dentro dos padrões estabelecidos pelo CONAMA, que tem como referência os valores guia recomendados pela Organização Mundial da Saúde. O aumento da quantidade de poluentes, bem como a sua dispersão no meio está diretamente associado as variáveis meteorológicas são responsáveis por esta dispersão ou concentração de substâncias. Diante disso, o presente estudo tem como principal objetivo identificar os principais poluentes e avaliar a qualidade do ar das capitais do Nordeste do Brasil, para o ano de 2015. A justificativa para a realização deste estudo se dá diante dessa problemática da falta de monitoramento da qualidade do ar na região Nordeste. Devido a ausência de estações de monitoramento da qualidade do ar para a maioria das capitais do da região foram utilizadas três bases de dados com a finalidade de estimar a qualidade do ar para as nove unidades Federativas, a saber, a Estação de Monitoramento de Concórdia na Região Metropolitana de Salvador no Estado da Bahia, o modelo ECMWRF Copernicus e os dados obtidos através do Satélite da NASA, os poluentes que foram avaliados são o CO e NO₂. Para a identificação da influência das variáveis meteorológicas nos processos de dispersão e concentração dos contaminantes atmosféricos, foi utilizado o modelo WRF/Chem, a fim de simular o estado da atmosfera para quantificar as espécies CO e NO₂.

Palavras-chave: modelo WRF/Chem, concentração, estimativa, poluição atmosférica.

ABSTRACT

Atmospheric pollution has an influence on air quality, which can be compromised if the substances emitted must meet the standards established by CONAMA, which has as reference the guide values recommended by the World Health Organization. The increase in the amount of pollutants, as well as its dispersion in the medium is directly associated with meteorological variables that are responsible for this dispersion or concentration of substances. Therefore, the main objective of this study is to identify the main pollutants and assess the air quality of the capitals of the Northeast of Brazil, for the year 2015. The justification for this study is given this problem of the lack of monitoring of the air quality in the Northeast region. Due to the absence of air quality monitoring stations for most capitals in the region, three databases were used in order to estimate the air quality for the nine Federative units, namely, the Concordia Monitoring Station in Metropolitan Region of Salvador in the State of Bahia, the ECMWRF Copernicus model and the data obtained through the NASA Satellite, the pollutants that were evaluated are CO and NO₂. To identify the influence of meteorological variables on the processes of dispersion and concentration of atmospheric contaminants, the WRF/Chem model was used in order to simulate the state of the atmosphere to quantify CO and NO₂ species.

Keywords: WRF/Chem model, concentration, estimation, air pollution.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Emissões relativas de poluentes por tipo de fontes..... | 19 |
| Figura 2: Evolução da frota veicular do Brasil no ano de 2015..... | 29 |
| Figura 3: a- Média da frota veicular para as regiões do Brasil. b- Percentagem da frota veicular distribuído por região..... | 30 |
| Figura 4: Unidades federativas da região Nordeste..... | 31 |
| Figura 5: a- evolução da frota veicular ao longo do ano de 2015. b- percentagem veicular para cada Estado do NEB. | 31 |
| Figura 6: Representação das Estações Meteorológicas da Região Metropolitana de Salvador, em destaque a estação 13 de Concórdia..... | 33 |
| Figura 7: Emissão de poluentes para o NEB, base de dados PREP-CHEM-SRC-1.5 coluna da esquerda, e base de dados ACOM/NCAR coluna da direita. | 37 |
| Figura 8: Médias da concentração de monóxido de carbono para a estação de monitoramento da qualidade do ar da estação de Concórdia - Salvador/BA..... | 39 |
| Figura 9: Níveis de concentrações de poluentes para a localidade de Concórdia, Salvador/BA no ano de 2015, utilizando o modelo de qualidade do ar WRF/Chem. . | 40 |
| Figura 10: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade relativa (c) e velocidade do vento (d), para a cidade de Salvador/BA, ano 2015..... | 42 |
| Figura 11: Concentração NO ₂ para NEB de acordo com os dados do ECMWF Copernicus..... | 44 |
| Figura 12: Variação mensal da velocidade do vento (d), para a cidade de João Pessoa/PB, ano 2015. | 45 |
| Figura 13: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade relativa (c) e velocidade do vento (d), para a cidade de João Pessoa/PB, ano 2015. | 45 |
| Figura 14: Concentração NO ₂ para o NEB de acordo com os dados da NASA..... | 47 |
| Figura 15: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade relativa (c) e velocidade do vento (d), para a cidade de Recife/PE, ano 2015..... | 47 |
| Figura 16: Concentração CO para o NEB de acordo com os dados da NASA..... | 49 |
| Figura 17: Acumulado mensal de precipitação pluviométrica nas capitais do NEB. | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 18: Condição meteorológica do NEB (Temperatura do Ar, Velocidade do Vento e Radiação Solar), para o dia 15/06/2015 para as 12h e 20h, resultados das simulações realizadas com o modelo WRF/Chem sistema ACOM/NCAR. | 51 |
| Figura 19: Variação espacial da concentração do CO (Monóxido de Carbono) e PM10 (Material Particulado 10 μ m) para o NEB, obtidos a partir de simulações com o modelo WRF/Chem, sistema ACOM/NCAR..... | 52 |
| Figura 20: Variação espacial da concentração do NO ₂ (Dióxido de Nitrogênio) e O ₃ (Ozônio) para o NEB, obtidos a partir de simulações com o modelo WRF/Chem, sistema ACOM/NCAR..... | 54 |
| Figura 21: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade relativa (c) e velocidade do vento (d), para as capitais do NEB, ano 2015, simulações utilizando o modelo atmosférico WRF..... | 55 |
| Figura 22: Concentração média de CO (a), NO ₂ (b), O ₃ (c), PM10 (d), Velocidade do Vento (e), e Temperatura do Ar (f), para as capitais do NEB, ano 2015, simulações WRF/Chem com sistema ACOM/NCAR. | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: padrões de qualidade do ar de acordo com a RESOLUÇÃO Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018..... | 20 |
| Tabela 2: Níveis de atenção, alerta e emergência para poluentes e suas concentrações de acordo com a RESOLUÇÃO Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018. | 21 |
| Tabela 3: Tempos de amostragem usados para os padrões de CO. | 23 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH₄- metano

CLP- Camada Limite Planetária

CO- Monóxido de carbono

CO₂- Dióxido de carbono

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente

DETRAN/AL- Departamento Estadual de Trânsito em Alagoas

EPA- Environmental Protection Agency

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MMA- Ministério do Meio Ambiente

MP₁₀- Material particulado 10 µm

MP_{2,5}- Material Particulado 2,5 µm

NEB- Nordeste Brasileiro

NO₂- dióxido de Nitrogênio

NO_x- Óxidos de Nitrogênio

O₃- Ozônio

ppb- Parte por bilhão

ppm- Parte por milhão

PRONAR- Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar

PRONCOVE- Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

SO₂- dióxido de enxofre

SO_x- Óxidos de enxofre

WRF/Chem- Weather Research and Forecasting – Chemistry

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| OBJETIVO GERAL | 16 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| JUSTIFICATIVA..... | 17 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 18 |
| 2.1. Padrões Nacionais de Qualidade do Ar..... | 18 |
| 2.2. Emissões veiculares no Nordeste do Brasil | 21 |
| 2.3. Padrão de qualidade do ar | 22 |
| 2.4. Estimativa de poluentes atmosféricos. | 23 |
| 2.4.1. Estimativas de poluentes utilizando imagens de satélite..... | 23 |
| 2.4.2. Estimativa de poluentes utilizando o modelo WRF/Chem..... | 24 |
| 2.5. Relação entre os poluentes NO ₂ e CO e as reações que ocorrem na troposfera..... | 23 |
| 3. METODOLOGIA | 29 |
| 3.1. Área de estudo | 30 |
| 3.2. Dados utilizados para avaliar a qualidade do ar no NEB | 32 |
| 3.2.1. Dados da estação de monitoramento de Concórdia em Salvador-BA | 32 |
| 3.2.2. ECMWF (<i>European Centre for Medium-range Weather Forecasting</i>) Copernicus | 30 |
| 3.2.3. Dados NASA | 34 |
| 3.2.4. Modelo WRF/Chem (<i>Weather Research and forecasting/Chemistry</i>). | 34 |
| 3.2.5. Inventário de Emissões como entrada química do modelo WRF/Chem | 35 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 38 |
| 4.1. Análise da qualidade do ar utilizando dados da estação de monitoramento de Concórdia na Região Metropolitana de Salvador/BA. | 38 |
| 4.2. Análise da qualidade do ar utilizando a base de dados ECMWF (<i>European</i> | |

| | |
|--|-----------|
| <i>Centre for Medium-range Weather Forecasting) Copernicus</i> | 43 |
| 4.3. Análise da qualidade do ar utilizando o satélite da NASA | 46 |
| 4.7. Dados obtidos do modelo WRF/Chem. | 50 |
| 5. CONCLUSÕES | 58 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 59 |

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera é responsável por vários processos químicos, nela ocorre à absorção de diferentes substâncias, seja no estado sólido, líquido ou gasoso, provenientes de fontes naturais ou antropogênicas; estes compostos podem se dispersar, reagir entre si ou com outras substâncias presentes no ar. Os poluentes atmosféricos originam-se principalmente pela queima de combustíveis fósseis para fins industriais e veiculares. (LISBOA, 2014).

Tomando como exemplo o estado de São Paulo, que registra como poluentes aqueles emitidos por fontes estacionárias e móveis por meio da combustão de processos industriais e queima de resíduos sólidos, estes são responsáveis pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2), hidrocarbonetos (CH), óxidos de nitrogênio (NO_x) e enxofre (SO_x), as fontes naturais registram emissões de poeiras e material particulado, além de gases como o ácido sulfídrico (H_2S) (CETESB, 2018).

Na região Nordeste do Brasil, a cidade de Fortaleza-CE, é a quinta maior capital em termos de população, com cerca de 2 milhões de habitantes (IBGE,2016). No Estado, foi registrada uma frota de mais de 1 milhão de veículos em circulação (DETRAN-CE, 2017), e assim como o estado de São Paulo, as fontes móveis podem estar relacionadas a emissão de poluentes atmosféricos.

De acordo com um estudo realizado por Oliveira *et. al.* (2019), desde o ano de 2007 não há monitoramento da qualidade do ar da capital Fortaleza localizada no Estado do Ceará, publicado pelos órgãos responsáveis, e apenas a comunidade científica reporta estudos de qualidade do ar, porém o monitoramento contínuo por parte dos órgãos ambientais tem sido negligente diante disso, a justificativa para este estudo se dá diante dessa problemática, a falta de monitoramento da qualidade do ar na região Nordeste.

Para este estudo, foram utilizadas três bases de dados com a finalidade de estimar a qualidade do ar para estas capitais, a primeira é a Estação de Monitoramento de Concórdia na Região Metropolitana de Salvador no Estado da Bahia. A estação conta com dados diários de poluentes atmosféricos, destacando para este estudo, o CO e NO_2 . A segunda base de dados é o modelo ECMWRF Copernicus, que também possui modelagem, e dispõe de dados de concentração

dos poluentes presentes neste estudo, já os dados obtidos através do Satélite da NASA, permite a observação dos dados de forma espacial, sendo assim, torna-se possível verificar a dispersão ou concentração de uma substância. Para as duas últimas fontes de dados, foram utilizados valores diários para todo o ano de 2015 para os poluentes CO e NO₂.

O modelo WRF/Chem neste estudo foi utilizado para identificar as possíveis relações de influência das variáveis meteorológicas sob a concentração dos poluentes estudados, a fim de simular o estado da atmosfera para quantificar as espécies CO e NO₂, bem como analisar o seu processo de dispersão e/ou concentração.

OBJETIVO GERAL

Estimar a qualidade do ar das regiões metropolitanas da Região Nordeste do Brasil.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar os dados obtidos a partir da Estação de Monitoramento de Concórdia, situada na Região Metropolitana de Salvador como ponto de partida para identificar os poluentes monóxido de carbono (CO) e Dióxido de carbono (NO₂), objetos de estudo deste trabalho.
- Estimar a qualidade do ar no Nordeste brasileiro utilizando os dados obtidos a partir da base de dados do ECMWF Copernicus e Satélite da Nasa para o ano de 2015.
- Simular as concentrações de poluentes obtidas nas regiões metropolitanas através do modelo WRF-Chem.
- Analisar a influência das variáveis meteorológicas simuladas no modelo WRF-Chem

JUSTIFICATIVA

Devido às emissões de compostos químicos, o clima urbano vem sofrendo alterações ao longo dos anos, o que classifica que a emissão dessas substâncias na atmosfera é uma variável importante por influenciar na saúde humana e meio ambiente a depender das suas concentrações (CORREIA, 2011).

Na região Nordeste, estudar, quantificar e analisar o monitoramento de poluentes é imprescindível, pois se trata de uma área que não conta com muitos investimentos para a criação de estações de monitoramento da qualidade do ar (Freitas *et al.*, 2018).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

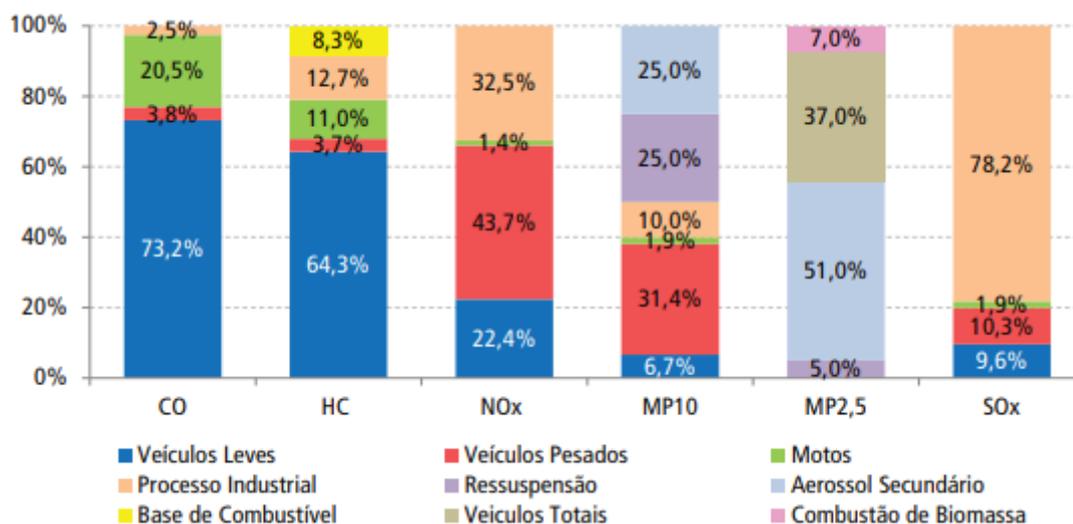
A Resolução Nº 491, de 19 de novembro de 2018, dispõe dos padrões estabelecidos, para a qualidade do ar, considerando como referência valores guia de substâncias emitidas na atmosfera de acordo com a Organização Mundial de saúde (OMS) em 2005. Porém a antiga resolução do CONAMA Nº 05 em 15 de junho de 1989 instituiu o PRONAR, com a finalidade da criação da Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar.

“Como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar das populações e melhoria da qualidade de vida com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica (Resolução CONAMA Nº 05, de 15/06/1989)”.

O Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar estabeleceu limites nacionais para as emissões, separando por tipo de fonte emissora e por poluentes prioritários, utilizando os padrões de qualidade do ar como ação de controle. Além disso, foram previstas medidas para a classificação das áreas de acordo com os níveis pretendidos de qualidade do ar, monitoramento, inventário de emissões e licenciamento ambiental (MMA, 2015).

Considerando que a emissão por veículos automotores é uma fonte móvel de poluição, em maio de 1986, a Resolução CONAMA nº 18 criou o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), coordenado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA). O aumento do número de veículos automotores pode corroborar para o aumento da concentração de poluentes que não devem ultrapassar o nível máximo tolerável, valores estes, que são definidos por órgãos ambientais.

Figura 1: Emissões relativas de poluentes por tipo de fontes.



Fonte: (CETESB, 2015).

De acordo com os dados do relatório da qualidade do ar oferecido pela CETESB (ver figura 1) é possível observar que em sua maioria, os poluentes emitidos no Estado de São Paulo para o ano de 2015 são de fontes móveis, onde as substâncias mais comuns emitidas por essas fontes são o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP₁₀), óxidos de nitrogênio (NOx) e os óxidos de enxofre (SOx) que tem maior índice nos processos industriais.

Os padrões de qualidade do ar definem os limites de um poluente na atmosfera, de modo que assegure a saúde e o meio ambiente. Tais padrões foram estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), e aprovados pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, pela resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, que regulamentou os poluentes padronizados no Brasil, podem ser representados pela tabela 1.

Tabela 1: padrões de qualidade do ar de acordo com a RESOLUÇÃO Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018.

| Poluente Atmosférico | Período de Referência | PI-1 | PI-2 | PI-3 | PF | |
|---|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----|
| | | mg/m ³ | m/m ³ | mg/m ³ | mg/m ³ | ppm |
| Material Particulado - MP10 | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | - |
| Material Particulado - MP2,5 | 24 horas | 60 | 50 | 37 | 25 | - |
| | Anual ¹ | 20 | 17 | 15 | 10 | - |
| Dióxido de Enxofre - SO ₂ | 24 horas | 125 | 50 | 30 | 20 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 30 | 20 | - | - |
| Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ | 1 hora ² | 260 | 240 | 220 | 200 | - |
| | Anual ¹ | 60 | 50 | 45 | 40 | - |
| Ozônio - O ₃ | 8 horas ³ | 140 | 130 | 120 | 100 | - |
| Fumaça | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | - |
| Monóxido de Carbono - CO | 8 horas ³ | - | - | - | - | 9 |
| Partículas Totais em Suspensão - PTS | 24 horas | - | - | - | 240 | - |
| | Anual ⁴ | - | - | - | 80 | - |
| Chumbo - Pb ₅ | Anual ¹ | - | - | - | 0,5 | - |
| 1 - média aritmética anual | | | | | | |
| 2 - média horária | | | | | | |
| 3 - máxima média móvel obtida no dia | | | | | | |
| 4 - média geométrica anual | | | | | | |
| 5 - medido nas partículas totais em suspensão | | | | | | |

Fonte: Disponível em: <https://www.in.gov.br/web>

Além dos valores estabelecidos para os poluentes, a resolução do CONAMA 11/2018 estabelece também os níveis de alerta mediante episódios críticos de poluição, a fim de prevenir os riscos a saúde da população; estes dados estão representados na tabela 2.

Tabela 2: Níveis de atenção, alerta e emergência para poluentes e suas concentrações de acordo com a RESOLUÇÃO Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018.

| PARÂMETROS | NÍVEIS | | |
|---|---------------|----------------|-------------------|
| | ATENÇÃO | ALERTA | EMERGÊNCIA |
| Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h | ≥ 800 | ≥ 1.600 | ≥ 2.100 |
| Partículas totais em suspensão (PTS) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h | ≥ 375 | ≥ 625 | ≥ 875 |
| SO ₂ X PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h | ≥ 65.000 | ≥ 261.000 | ≥ 393.00 |
| Monóxido de carbono (ppm) – 8 h | ≥ 15 | ≥ 30 | ≥ 40 |
| Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 1 h | $\geq 400^*$ | ≥ 800 | $\geq 1.000^{**}$ |
| Partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h | ≥ 250 | ≥ 420 | ≥ 500 |
| Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | ≥ 250 | ≥ 420 | ≥ 500 |
| Dióxido de Nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | ≥ 1.130 | ≥ 2.260 | ≥ 3.000 |

Fonte: Disponível em: <https://www.in.gov.br/web>

2.2. Emissões veiculares no Nordeste do Brasil

A literatura ainda é um pouco escassa em estudos que abrangem uma análise completa da qualidade do ar de todos os centros urbanos da região nordeste brasileira, porém é sabido que a poluição está relacionada com as fontes antropogênicas como a combustão, processos industriais, queima de resíduos sólidos e a frota veicular que corresponde a aproximadamente 80% dos poluentes gasosos presentes na atmosfera (LISBOA, 2014). Portanto, a análise dos poluentes presentes na atmosfera, tem sido às medidas tomadas por órgãos ambientais e outros segmentos da sociedade, com o objetivo de reduzir e controlar as emissões veiculares.

Em um estudo realizado por GERMANO (2009) foram definidas as taxas de emissões de gases poluentes de origem veicular para a cidade de Maceió, no Estado de Alagoas, a partir das principais rotas de tráfego da cidade, que para o ano em questão, apresentava uma frota de aproximadamente 206 mil veículos para o ano de 2009, considerou que há emissão de 39 mil ton/ano de CO e 12 mil ton/ano de NOx. Em um estudo realizado por Silva (2012), para o Estado de Alagoas, cerca de Em Alagoas cerca de 80 veículos entre novos, seminovos são vendidos mensalmente (Superintendência Municipal de Transporte e Trânsito-SMTT). De acordo com o plano de controle veicular realizado pelo IMA (Instituto do Meio Ambiente), cerca de 95% da poluição da capital Maceió vem da queima de combustíveis.

O Ceará é o quinto estado mais populoso do Brasil, localizada na Região Nordeste, a capital Fortaleza, possui um clima tropical que se caracteriza por duas estações predominantes, a chuvosa e seca. De acordo com LOPES *et.al.* (2018) a área da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), possui cerca de 4 milhões de habitantes e por consequência houve o aumento da frota veicular, sendo considerada a décima segunda maior região metropolitana do Brasil.

Diante disso, muitos autores têm elaborado estudos compostos por inventários de emissões de poluentes em regiões urbanas utilizando metodologias como programas de simulação, imagens por sensoriamento remoto e monitoramento contínuo de substâncias nocivas ao meio e a saúde humana (LOPES *et.al.*, 2018).

2.3. Padrão de qualidade do ar

De acordo com as resoluções normativas que definem o padrão de qualidade do ar nacional, a resolução CONAMA Nº 491 de 19/11/2018, define como forma de poluente atmosférico qualquer que seja a forma de matéria que se torne nociva à saúde, ao bem-estar público, prejudiciais à fauna e a flora e/ou torne prejudicial às atividades normais da comunidade (Disponível em: < <https://www.in.gov.br/>>).

De modo a exemplificar o padrão da qualidade do ar, e tomando como base o relatório de qualidade do ar da CETESB (2008), a região metropolitana de São Paulo, não registra a ultrapassagem do padrão de qualidade do ar para o monóxido de carbono, considerando o nível máximo de 9 ppm para o período de 8 horas de exposição, estabelecidos pelo CONAMA. Essa concentração está ligada ao período diário, ou seja, podendo ser considerado um período de 8 horas não sendo necessariamente um período de horas seguidas, esses valores pode ser somado ao longo do dia, uma vez que, existem países que adotam como referência um período de amostragem menor (ver tabela 3).

Tabela 3: Tempos de amostragem usados para os padrões de CO.

| Tempo de Amostragem | Países |
|---------------------|--|
| 15 min | OMS, Hong Kong (proposição) |
| 30 min | OMS, Hong Kong (proposição) |
| 1 h | OMS, EUA, CARB (EUA), Canadá, Nova Zelândia, Hong Kong, China, Coreia do Sul, Índia, Chile e Brasil. |
| 8 h | OMS, EUA, CARB (EUA), Canadá, Nova Zelândia, Hong Kong, China, Coreia do Sul, Índia, Chile e Brasil. |
| 24 h | Suíça, Japão e China |
| Sem padrão | Peru |

Fonte: Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/>>

Tomando como referência Hong Kong na China, considerada uma cidade com alto índice de poluição, em um estudo Arbex *et. al.* (2012), foi avaliado a associação entre poluentes aéreos e a influência no desenvolvimento de doenças respiratórias entre os anos 2000-2004.

De acordo com a tabela 4, é possível observar que Hong Kong o tempo de amostragem para a determinação da concentração de poluentes são de 15 e 30 minutos, e 1-8 horas de exposição, e o Brasil estabelece um menor número de amostragem, sendo apenas para de 1-8 horas para todo o país, considerando que existem grandes centros urbanos, como São Paulo. Dessa forma, os números estabelecidos pela resolução do CONAMA tornam-se permissivos para o Estado.

2.4. Estimativa de poluentes atmosféricos.

2.4.1. Estimativas de poluentes utilizando imagens de satélite.

O método do uso das imagens de satélite tem sido utilizado em alguns estudos para detectar a qualidade do ar, principalmente para poluentes presentes na estratosfera e troposfera. Dentre eles, podemos destacar o dióxido de Nitrogênio (NO₂) e os aerossóis, sendo o primeiro um dos principais componentes da poluição do ar urbana sendo gerado principalmente por ações antrópicas (BECHLE *et al.*, 2013).

A utilização de imagens de satélite para estudos de monitoramento e estimativa da qualidade do ar tem sido fundamental, uma vez que para algumas regiões como o Nordeste do Brasil são escassas de investimentos em redes de monitoramento. De acordo com Freitas *et.al* (2018), que realizou estudos de monitoramento do

dióxido de nitrogênio utilizando imagens de satélite, por permitir a observação em grande expansão espacial em um pequeno espaço temporal.

No estudo realizado por Freitas *et.al* (2018), utilizando o Satélite Aura, o autor gerou imagens espectrais que permitiu quantificar o NO₂ presente na atmosfera e os locais que apresentavam maiores concentrações desta substância, com o objetivo de quantificar as concentrações e a identificação da variação espacial e temporal, a fim de relacionar as tendências mensais e sazonais deste gás e a sua relação com as variáveis meteorológicas.

Em um estudo realizado por Azevedo *et.al.* (2021) através do processamento de imagens de satélite utilizando o TROPOMI Sentinel - 5P e MODIS AOD no primeiro semestre de 2019 e 2020, início do período pandêmico. O estudo foi realizado para a região Nordeste do Brasil e conduzido pelo uso da plataforma de processamento de dados do Google Earth Engine (GEE), que disponibiliza as imagens.

O autor considerou as áreas com fontes potenciais de emissão, a saber, áreas urbanas, áreas industriais e os entornos de reservatórios de água. Para as áreas urbanas foram escolhidas as cidades de Recife e Caruaru- PE. De acordo com os dados obtidos pelas imagens de satélite para as cidades de Recife e Caruaru, houve uma diminuição observada nos dois primeiros bimestres de 2020 para o poluente NO₂. De acordo com Azevedo *et.al.* (2021), esse fato pode ser justificado devido aos maiores índices do isolamento social.

2.4.2. Estimativa de poluentes utilizando o modelo WRF/Chem.

O modelo de previsão do tempo e clima Weather Research Forecast/Chemistry é utilizado para a verificação da qualidade do ar. O sistema numérico de previsão do tempo em multiescala torna-se aplicável por ser eficaz tanto para previsão operacional quanto para pesquisas atmosféricas, uma vez que permite a identificação de poluentes como o monóxido de carbono, ozônio, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio (GRELL *et al.*, 2005).

O WRF tem uma estrutura modular que possui um módulo específico para cada cálculo de poluente, esta estrutura modular é denominada CHEM. As reações são obtidas on-line, o que evita que haja interpolação de dados. Além disso, a viabilidade do modelo permite que sejam acoplados outros processos físicos e

químicos tais como transporte, a emissão do poluente e as suas transformações, interação com aerossóis, radiação, entre outros (SCHUCH; FREITAS, 2017). Neste estudo o modelo WRF disponibiliza dados de concentração, dados de vento e temperatura. O modelo matemático foi utilizado com a finalidade de comparar os dados obtidos através das outras bases, com as variáveis meteorológicas e a sua influência nos processos de dispersão dos poluentes.

Uma grande variedade de estudos relaciona a dispersão de poluentes atmosféricos com modelos matemáticos. De acordo com IRIART *et al.* (2016), em um estudo sobre a simulação da dispersão de gases em um centro de lançamento de foguetes, foi utilizado o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF), estando acoplado ao seu módulo químico para que fosse simulada a dispersão dos poluentes emitidos por um Veículo Lançador de Satélites (VLS) (IRIART; FISCH, 2016).

As simulações foram feitas para períodos diurnos e noturnos durante as estações secas e chuvosas, e mediante a isso foi identificado às regiões afetadas pelas emissões de monóxido de carbono e a trajetória dessas partículas de acordo com o vento, e identificou-se que das regiões atingidas, o estacionamento do local apresentou maiores níveis de concentração de monóxido, além disso, com as simulações utilizando os modelos, foi possível gerar dados de tempo de dissipação do poluente (IRIART; FISCH, 2016).

O modelo WRF/Chem tem sido bastante utilizado em estudos de qualidade do ar e poluição, de acordo com CUCHIARA *et al.* (2014) em um estudo foi possível identificar e quantificar as previsões da região de Houston no Texas quando alguma parametrização da camada limite planetária é alterada, e dessa maneira, os autores encontraram diversas variáveis que podiam ser correlacionadas com as variáveis meteorológicas da região, a saber, razão de mistura de vapor d'água, temperatura potencial, entre outros.

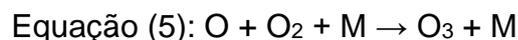
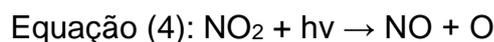
O WRF/Chem foi utilizado por CHAPMAN *et al.* (2009) para avaliar a influência das fontes pontuais de aerossóis levando em consideração seus efeitos diretos e indiretos, e analisando os efeitos da retroalimentação do modelo nos aerossóis das nuvens e na radiação incidente. Diante disso, o modelo escolhido para este estudo, se deu através da sua estrutura modular, que podem ou não serem acoplados. Este modelo possui módulos de previsão do tempo (REAL), químico (CHEM), uma vez

que será trabalhada a estimativa de poluentes, e estes, podem ser trabalhados de forma integrada e funcionar ao mesmo tempo.

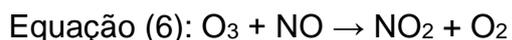
2.5. Relação entre os poluentes NO₂ e CO e as reações que ocorrem na troposfera.

As principais substâncias emitidas diretamente pelos veículos durante o processo de combustão são o dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). Esta seção consiste na apresentação das principais reações que acontecem na troposfera através dos poluentes NO₂ e CO, objetos de estudo deste trabalho.

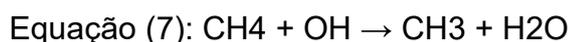
Sabe-se que na presença da radiação solar os óxidos de nitrogênio (NO e NO₂) podem dar origem a outro poluente, o ozônio (O₃) que ocorre pela fotólise do NO₂ como pode ser visto na equação 4.



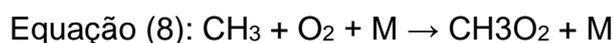
De acordo com SILVA (2018) não há outras fontes significativas de ozônio na atmosfera além da reação 5. Uma vez formado, o O₃ reage com o NO podendo regenerar o NO₂:



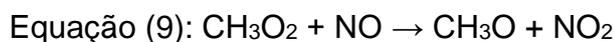
Ainda de acordo com o autor, as reações 4,5 e 6, chegarão a um ponto no qual o NO₂ será quebrado e regenerado de forma rápida até que um ciclo estável possa ser mantido. Este mesmo ciclo poderá ser alterado na presença de monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV's) que podem sofrer oxidação através dos radicais hidroxilas (OH) como pode ser visto na equação 7.



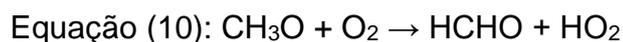
Já a reação de oxidação do metano (CH₄) que é um composto orgânico volátil na presença do OH, o radical metil (CH₃) irá reagir com o gás oxigênio formando o produto radical peróxido de metil (CH₃O₂):



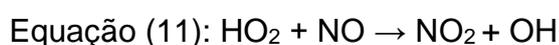
O radical peróxido de metil (CH_3O_2) na troposfera pode reagir com o NO, produzindo então o radical metóxi (CH_3O) e NO_2 .



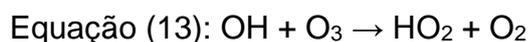
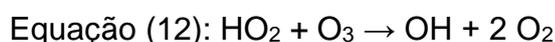
Para o produto CH_3O formado na reação 9, na troposfera, poderá reagir com o O_2 que dará origem ao formaldeído (HCHO) e o radical HO_2 .



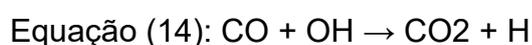
O produto HO_2 pode reagir com NO formando regenerando o NO_2 e formar hidroxila (OH):



De acordo com ROJAS (2013), as reações 9 e 11, a produção de dióxido de nitrogênio (NO_2) podem resultar em uma alta produção de ozônio a partir das equações 4 e 5. Além disso, os radicais HO_2 e OH obtidos como produtos da reação durante o processo de oxidação do metano (CH_4) também podem reagir com o ozônio de acordo com as equações 12 e 13.



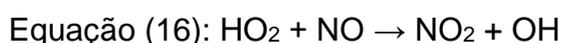
Já para o poluente monóxido de carbono (CO), através das reações de oxidação dessa substância, seu ciclo se inicia quando ele reage com o radical hidroxila, formando CO_2 :



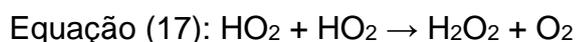
O átomo de hidrogênio (H) que foi formado na oxidação da reação 14 reage com o O_2 para formar o produto hidroperóxido (HO_2):



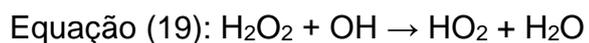
O produto HO_2 pode reagir com o NO, para formar NO_2 e regenerar o radical hidroxila:



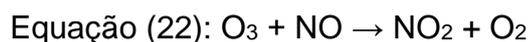
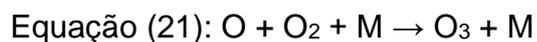
O radical HO₂ também reage com ele mesmo para formar o peróxido de hidrogênio (H₂O₂):



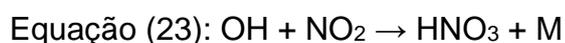
O peróxido de hidrogênio é temporariamente um reservatório de HO_x (OH + HO₂), que pode ocorrer em duas etapas, representadas pelas equações 18 e 19:



O NO₂ produzido na reação 16 participa do ciclo fotoquímico do NO_x (NO + NO₂) representados pelas reações 20, 21 e 22:



O ciclo se finda quando o radical hidroxila (OH) e o dióxido de nitrogênio (NO₂) reagem e formam o ácido nítrico como representado na equação 23.

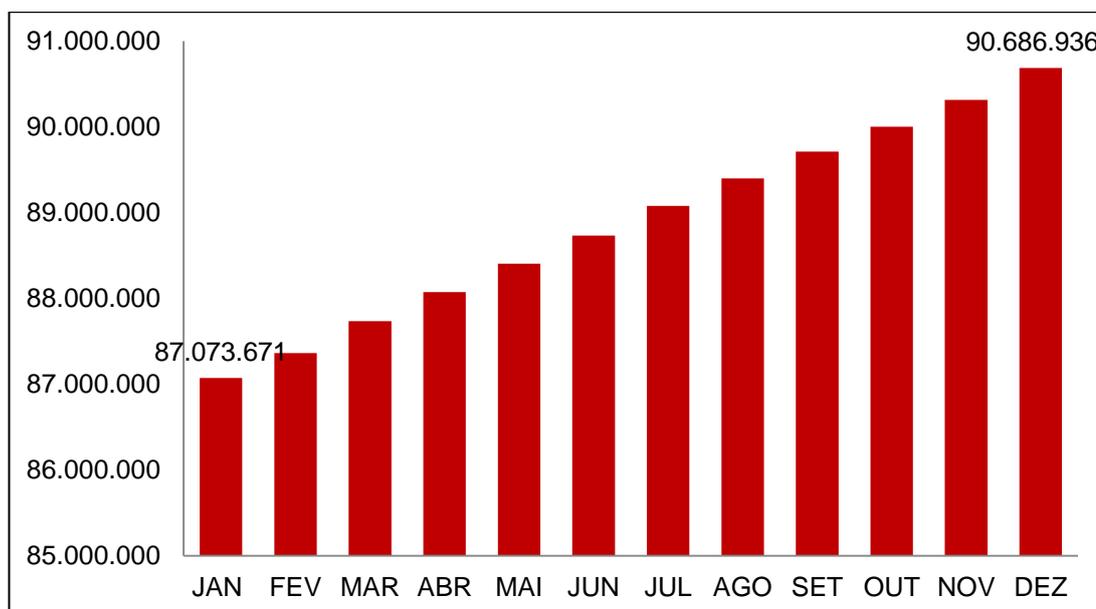


Como visto, é importante a análise da qualidade do ar, pois muitas substâncias que são emitidas na atmosfera, podem formar ciclos e conseqüentemente novas substâncias que trazem riscos a saúde e ao meio ambiente.

3. METODOLOGIA

Com o aumento da população e do número de veículos no Brasil (ver figura 2), pressupõe-se que as pessoas encontram-se mais expostas à poluição, e com a mudança nessas variáveis, conseqüentemente os índices de poluição e qualidade do ar podem estar relacionados a este aumento. Esta seção destaca as etapas da realização do estudo da avaliação da qualidade do ar na região Nordeste. De acordo com os dados do DENATRAN (2015), em janeiro, o país contava com uma frota de aproximadamente 87.073.671, tendo aumentado ao longo do ano. A frota de brasileira em 2015 assume uma média de 88.882.052, incluindo todos os tipos de veículos automotores.

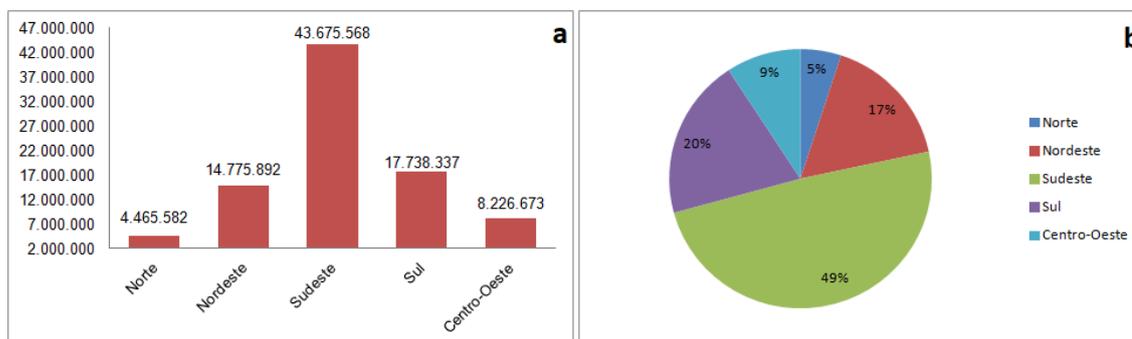
Figura 2: Evolução da frota veicular do Brasil no ano de 2015.



Fonte: Autor, 2021.

A figura 3a mostra a média da frota veicular de acordo com as regiões brasileiras, e o gráfico 4b, aponta o percentual da frota veicular levando em consideração todos os veículos automotores movidos à gasolina, diesel e etanol.

Figura 3: a- Média da frota veicular para as regiões do Brasil. b- Percentagem da frota veicular distribuído por região.



Fonte: Autor,2021.

Com o auxílio da figura 3, é possível observar que a região sudeste é a maior em termos de frota veicular, e a região Norte possui um número menor de veículos automotores (ver figura 3b). Correspondendo a aproximadamente 17% da frota brasileira, a região nordeste, foi escolhida para desenvolver este estudo, por não haver monitoramento da qualidade do ar nas capitais, sendo necessária a realização de mais estudos para tornar conhecidos os níveis dos contaminantes atmosféricos.

3.1. Área de estudo

A Região Nordeste ocupa uma área total de 1.561.177km² e fica localizada entre os meridianos 48° 05' W - 35° 02' W e paralelos 1° S - 18° 05' S. A região é banhada, ao Norte e a Leste, pelo oceano Atlântico, e, foi escolhida como ponto de partida para o início deste estudo, pois vem crescendo ao longo dos anos sendo a terceira maior região do Brasil e a maior em número de estados, ao todo são nove unidades federativas, a saber, Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Maranhão (MA), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE), como representado na figura 5. (Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al.html>>). As respectivas capitais nordestinas são: Maceió/AL, Salvador/BA, Fortaleza/CE, São Luis/MA, João Pessoa/PB, Recife/PE, Teresina/PI, Natal/RN e Aracaju/SE.

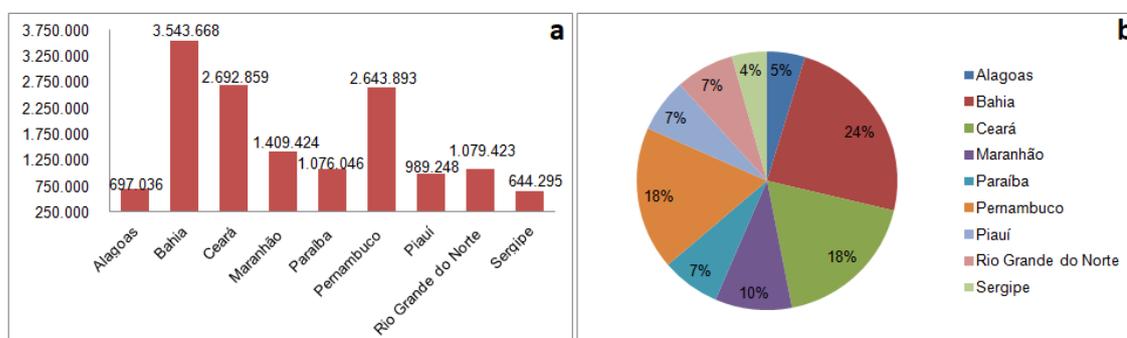
Figura 4: Unidades federativas da região Nordeste.



Fonte: Autor, 2021.

O ano de 2015 foi escolhido para desenvolver este estudo, devido a presença dos dados da Estação de Concórdia na Bahia, que foi utilizada para como ponto de partida. Para o ano de 2015 foi registrado uma frota veicular de aproximadamente 14.775.892 para todo o NEB. Em geral todos os estados do Nordeste do Brasil apresentam frota veicular acima de 600 mil em 2015 (ver figura 5a), sendo os estados da Bahia, Ceará e Pernambuco com maiores frotas do Nordeste, sendo o estado de Sergipe e Alagoas as menores, com números abaixo de 1 milhão.

Figura 5: a- evolução da frota veicular ao longo do ano de 2015. b- porcentagem veicular para cada Estado do NEB.



Fonte: Autor, 2021.

Com o auxílio da figura 5a, pode-se afirmar que a quantidade de veículos da região Nordeste tem frota similar as regiões Centro-Oeste e Sul, e estando muito abaixo da região Sudeste. Avaliando a distribuição percentual, ainda na figura 7b, os estados da Bahia, Ceará e Pernambuco são responsáveis por aproximadamente 60% da frota, dados obtidos no portal do DENATRAN, disponível no site do ministério da infraestrutura, que estabelece as percentagens veiculares por região.

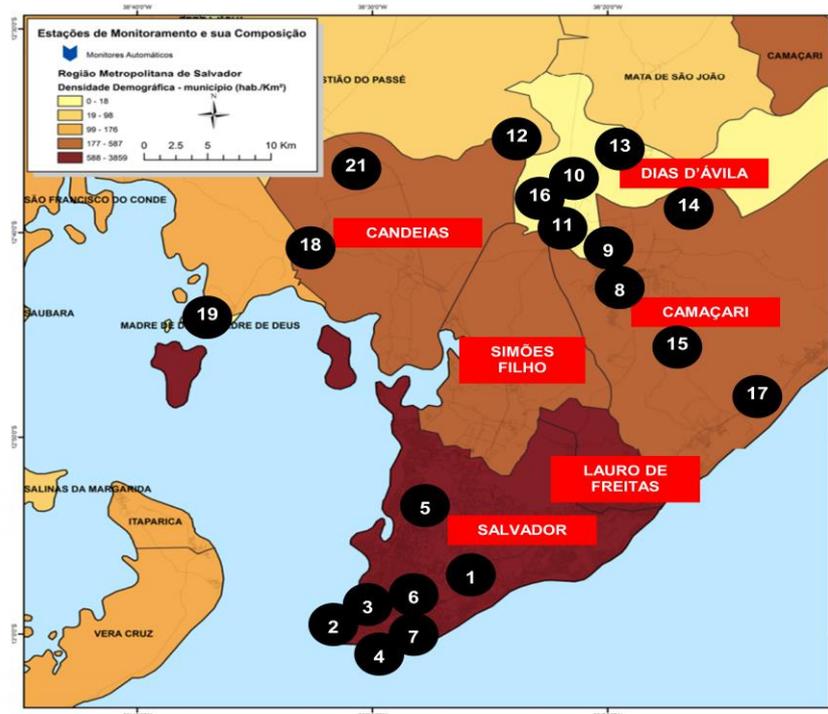
3.2. Dados utilizados para avaliar a qualidade do ar no NEB

Foram realizadas análises da qualidade do ar para as capitais dos estados do NEB, e para isso o presente estudo conta com variadas fonte de dados, tomando como ponto de partida a estação de monitoramento de qualidade do ar de Salvador-BA. As demais fontes são provenientes da base de dados do Copernicus, que são divulgados na plataforma Windy (<https://www.windy.com/>) e disponibilizados na plataforma ECMWF Copernicus Programme (<https://atmosphere.copernicus.eu/data>); NASA (<https://data.nasa.gov/>). Além destes, foi utilizado o modelo WRF/Chem, com a finalidade de comparar as concentrações das substâncias com as variáveis meteorológicas tais como velocidade e direção do vento e temperatura. O período de dados horário e diário estudados foi o ano de 2015 (janeiro a dezembro), e os poluentes presentes neste trabalho são o monóxido de carbono (CO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) Foram considerados dados horários para os períodos de 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00.

3.2.1. Dados da estação de monitoramento de Concórdia em Salvador-BA

Tendo em vista que a Bahia é o estado com maior percentagem da frota veicular, os dados da estação de monitoramento de qualidade do ar e estação meteorológica automática de salvador é uma das ferramentas utilizadas neste estudo. A estação automática de superfície possui uma memória central que está ligada a sensores meteorológicos, tais como temperatura, pressão, concentração de poluentes, entre outros. A estação de Concórdia, número 13 da figura 6, na Região Metropolitana de Salvador (RMS) está localizada a 13° 19 ' 33"S, 39° 35 ' 53" W.

Figura 6: Representação das Estações Meteorológicas da Região Metropolitana de Salvador, em destaque a estação 13 de Concórdia.



Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2014.

De acordo com o Instituto de energia e meio ambiente, ao publicar o primeiro diagnóstico de monitoramento de qualidade do ar no Brasil no ano de 2014, o monitoramento para esta estação é automático, possui confiabilidade e se dá de forma contínua, baseando-se nas propriedades físico-químicas das substâncias e são analisadas em tempo real através de métodos ópticos tais como absorção ultravioleta, infravermelho entre outros.

A estação meteorológica presente neste estudo está localizada na cidade de Dias D'Ávila-BA, e possui monitoramento para os poluentes PM₁₀, SO₂, H₂S, CO, NH₃ e NO₂, e os parâmetros meteorológicos registrados são direção e velocidade do vento.

3.2.2. ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasting*) Copernicus.

O provedor de dados europeu Copernicus disponível no site (<https://atmosphere.copernicus.eu/data>), que gera resultados pelo modelo de previsão ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasting*). O Copernicus é uma ferramenta baseada em observações por satélite, que fornece dados em tempo real a um nível global, podendo recolher informações *in situ*. Dessa forma, o Copernicus pode criar mapas que permitem a identificação de anomalias no local estudado, e extrai as informações estatisticamente. Neste estudo foram extraídas informações a respeito do poluente NO₂. Porém, esta fonte de dados fornece informações para todo o globo, porém foram extraídas informações para o nordeste do Brasil.

Além disso, o modelo de previsão fornece dados de qualidade do ar para outros poluentes como material particulado PM_{2,5}; já para parâmetros meteorológicos o modelo apresenta dados de direção do vento, temperatura e umidade relativa.

3.2.3. Dados NASA

A agência espacial americana (NASA) possui um satélite para pesquisa e previsão para a obtenção de dados para análise climática a curto e longo prazo. O site da NASA (<https://data.nasa.gov/>) disponibiliza de forma gratuita dados de condições climáticas e ambientais a para o globo. Com uma resolução temporal de 24 horas, o satélite é capaz de monitorar a poluição do ar a uma escala não só global, bem como local e regional. Para este estudo foram utilizados dados locais, em específico para a região nordeste do Brasil. Os dados coletados foram diários para o ano de 2015 e, os valores foram disponibilizados no GRADS para a obtenção de imagens espaciais para todo o nordeste, esta fonte, foi utilizada para a obtenção de dados de dióxido de nitrogênio.

3.2.4. Modelo WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting/Chemistry*).

A parte meteorológica do modelo WRF, foi configurado de modo a cobrir todo o NEB, com resolução de 12km e 131 pontos em X e Y, bem como 31 níveis verticais.

As parametrizações foram Microfísica das Nuvens (Lin et al. scheme), Radiação de Onda Longa (rrtmg scheme), Radiação de Onda Curta (Goddard Short wave), Camada Limite Planetária (ACM2 Pleim Scheme), Camada Limite Superficial (Monin-Obukhov Scheme), uso do solo (NOAH Land-Surface Model), Cúmulos (New Grell Scheme G3).

Para o presente estudo foi utilizado o modelo WRF/Chem para realizar simulações de qualidade do ar para o Nordeste brasileiro. O sistema numérico de previsão do tempo em multiescala torna-se aplicável por ser eficaz tanto para previsão operacional quanto para pesquisas atmosféricas, uma vez que permite a identificação de poluentes como o monóxido de carbono, ozônio, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio (GRELL *et al.*, 2005).

O WRF tem uma estrutura modular que possui um módulo específico para tratamento da química da atmosfera (emissão, reações, dispersão, difusão), esta estrutura modular é denominada CHEM. As reações são obtidas on-line, o que evita que haja interpolação de dados. Além disso, a viabilidade do modelo permite que sejam acoplados outros processos físicos e químicos tais como transporte, a emissão do poluente e as suas transformações, interação com aerossóis, radiação, entre outros (SCHUCH; FREITAS, 2017). Neste estudo o modelo WRF disponibiliza dados de concentração, dados de vento e temperatura. O modelo matemático foi utilizado com a finalidade de comparar os dados obtidos através das outras bases, com as variáveis meteorológicas e a sua influência nos processos de dispersão dos poluentes.

O módulo químico do modelo WRF/Chem foi configurado com as mesmas características de domínio da parte meteorológica, e da mesma forma sendo suficiente para cobrir todo o território do Nordeste do Brasil (NEB). As opções químicas utilizadas para realizar as simulações diárias para todo o mês de junho/2015 (chem_opt=303 RADM2 e GOCART, biomass_burn_opt = 1, plumerisefire_frq = 120, bio_emiss_opt=3 MEGAN).

3.2.5. Inventário de Emissões como entrada química do modelo WRF/Chem

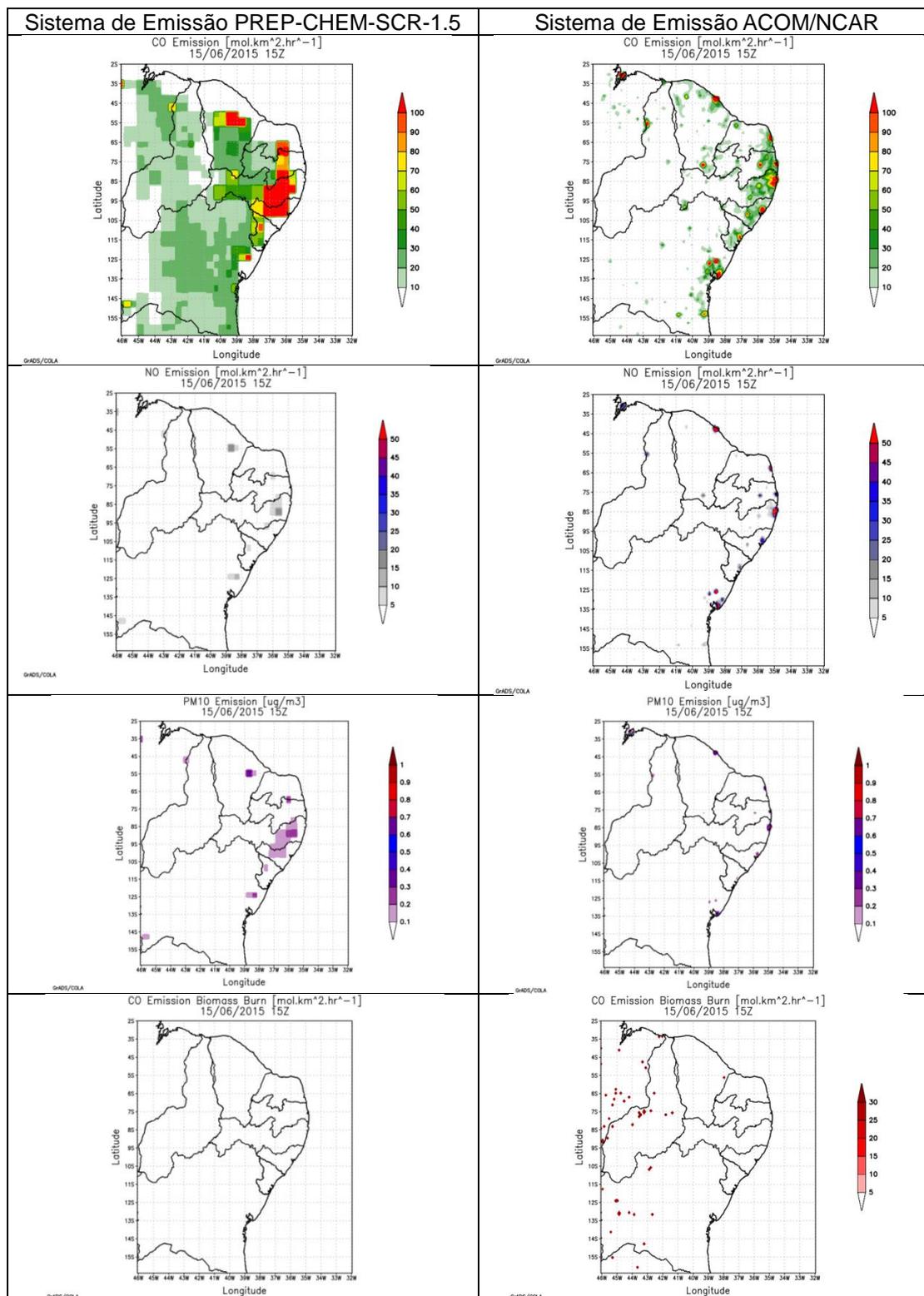
Inventários de emissões utilizados como condição inicial para as simulações realizadas com o modelo WRF/Chem foram baseados nos sistemas ACOM/NCAR e

PREP-CHEM-SRC-1.5. O sistema ACOM/NCAR (*“Atmospheric Chemistry Observations and Modeling Lab”* do *“National Center for Atmospheric Research”*) desenvolveu programas de pré-processamento de dados de entrada para o modelo de qualidade do ar WRF/Chem, condição inicial e de contorno química (mozbc, MOZART-4 e CAM *“Chem global model output”*), emissão antropogênica (anthro_emiss, *global EDGAR-HTAP emission inventory*), emissão biogênica (bio_emiss, *Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature - MEGAN*), emissão por queimadas (fire_emiss, *Fire Inventory for NCAR – FINN*).

O sistema PREP-CHEM-SRC versão 1.5 (PREP-CHEM-SRC-1.5), foi desenvolvido para estimar as emissões de gases e aerossóis para áreas urbanas/industriais, biogênica, queima de biomassa, fontes vulcânicas e para biocombustíveis e queimadas agrícolas, ver Longo, et al., 2010. Esse sistema disponibiliza uma base de dados com alta resolução temporal e espacial e detecção de focos de queimadas utilizando satélites. O sistema PREP-CHEM-SRC-1.5 foi configurado de forma semelhante ao ACOM/NCAR, *emissão antropogênica (anthro_emiss, global EDGAR-HTAP emission inventory)*, *emissão biogênica (bio_emiss, Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature - MEGAN)*, *emissão por queimadas (fire_emiss, Biomass Burning Emissions Inventory - 3BEM)* (Freitas, et al., 2011).

De modo a comparar as bases de emissão, as figuras dispostas em Figura 7, demonstram a intensidade e localização das emissões de poluentes na área de estudo, o Nordeste Brasileiro. Em termos de intensidade ambos os sistemas estimam emissão na mesma magnitude para os poluentes utilizados como entrada do modelo WRF/Chem. Porém no tocante ao posicionamento das fontes de emissões, percebe-se que o sistema de emissão ACOM/NCAR é mais preciso, tendo como parâmetro o posicionamento das Regiões Metropolitanas do NEB (RMNEB). Vale destacar ainda, que para o presente estudo não foi possível obter informações de fontes de emissão por queimadas no sistema de emissão PREP-CHEM-SCR-1.5. Por este motivo, serão analisados os resultados obtidos com o sistema de emissão ACOM/NCAR

Figura 7: Emissão de poluentes para o NEB, base de dados PREP-CHEM-SRC-1.5 coluna da esquerda, e base de dados ACOM/NCAR coluna da direita.



Fonte: Autor, 2021.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

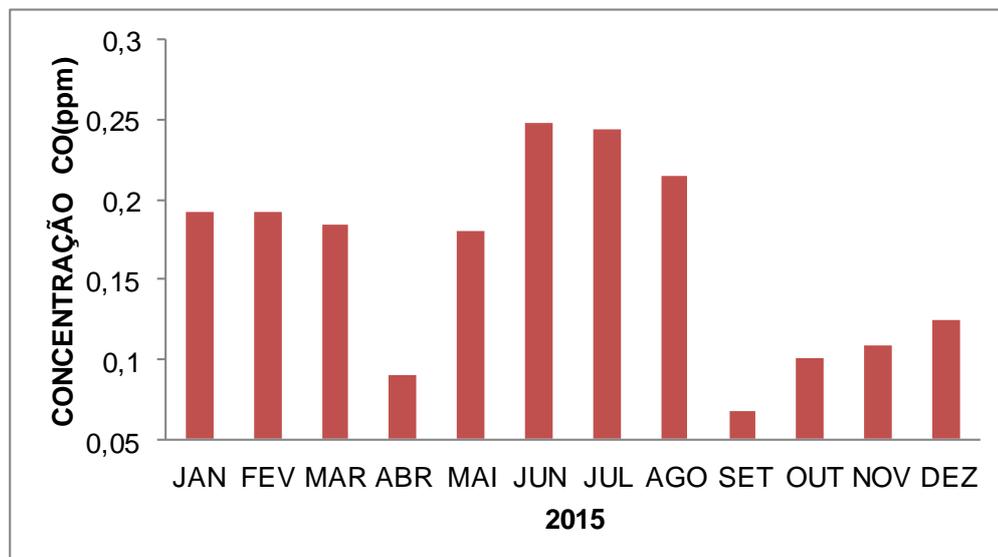
Nesta seção serão abordados os fatores e parâmetros que determinam a qualidade do ar para as principais regiões metropolitanas do NEB. Desde resoluções e normativas governamentais que definam padrões de qualidade do ar, fontes de emissões de poluentes, concentrações de poluentes e dispersão dos poluentes.

4.1. Análise da qualidade do ar utilizando dados da estação de monitoramento de Concórdia na Região Metropolitana de Salvador/BA.

O monitoramento da qualidade do ar para Salvador/BA foi realizado de acordo com a legislação brasileira vigente. De acordo com o gráfico 4a e 4b, na seção 3.2, que mostra a frota veicular das regiões do Brasil, tendo o Nordeste no mesmo patamar do Sul e Centro-Oeste, e ainda mostrando que a Bahia é o estado nordestino com maior frota veicular, acima de 4 milhões de veículos na estimativa realizadas em janeiro de 2020. Inicialmente foi realizado um levantamento dos dados de qualidade do ar para a região metropolitana de Salvador/BA, e ainda destacando o fato de ser a única cidade Nordeste com um sistema de monitoramento de qualidade do ar. Os dados estão disponíveis de forma diária, e, nesta seção serão apresentados na forma de gráficos, que representarão médias mensais correspondentes ao ano de 2015 para o poluente monóxido de carbono.

Pode-se concluir que os dados da Estação de Concórdia localizada em Salvador/Bahia (ver figura 8) para o monóxido de carbono no ano de 2015, também estão dentro dos padrões de qualidade do ar, não superando os valores da média estabelecida pelo CONAMA de 9ppm, e sendo o mês de junho/2015 com maior concentração de CO (0,25ppm). Logo a atmosfera pode ser classificada como não poluída para o poluente monóxido de carbono.

Figura 8: Médias da concentração de monóxido de carbono para a estação de monitoramento da qualidade do ar da estação de Concórdia - Salvador/BA.

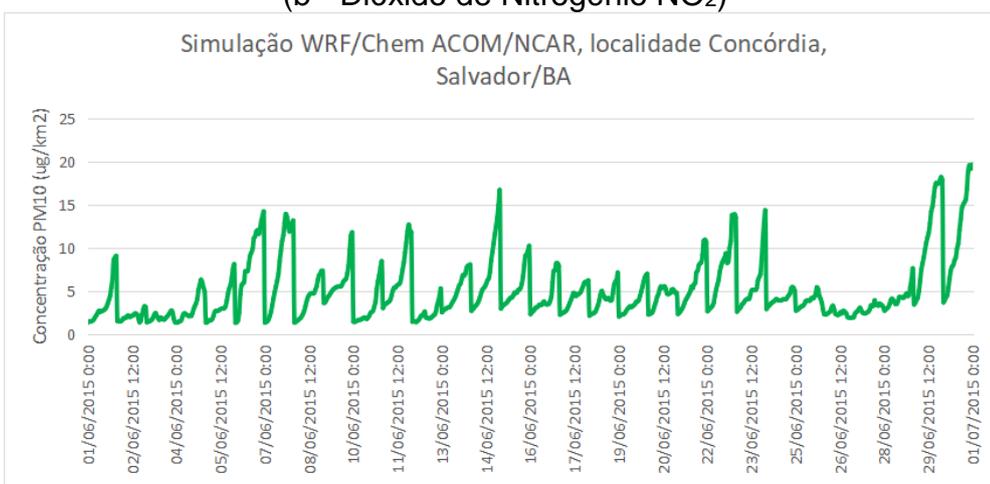
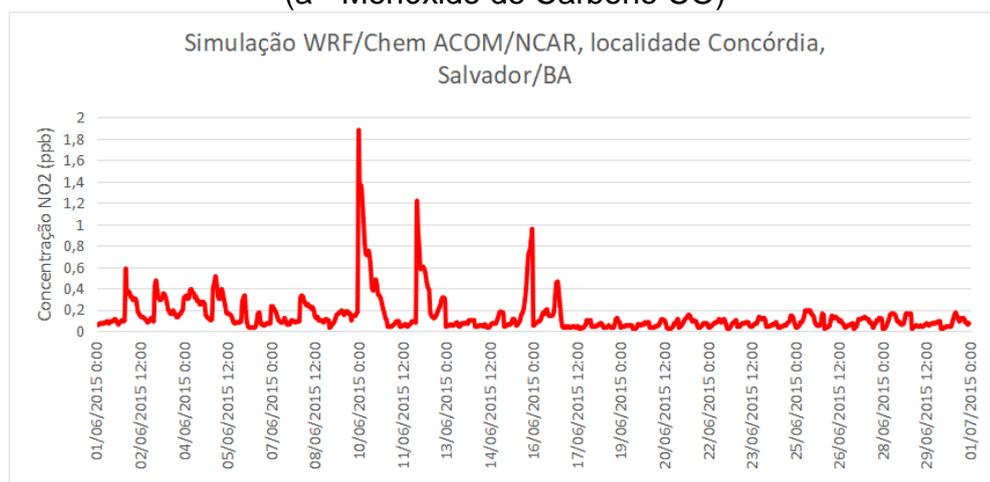
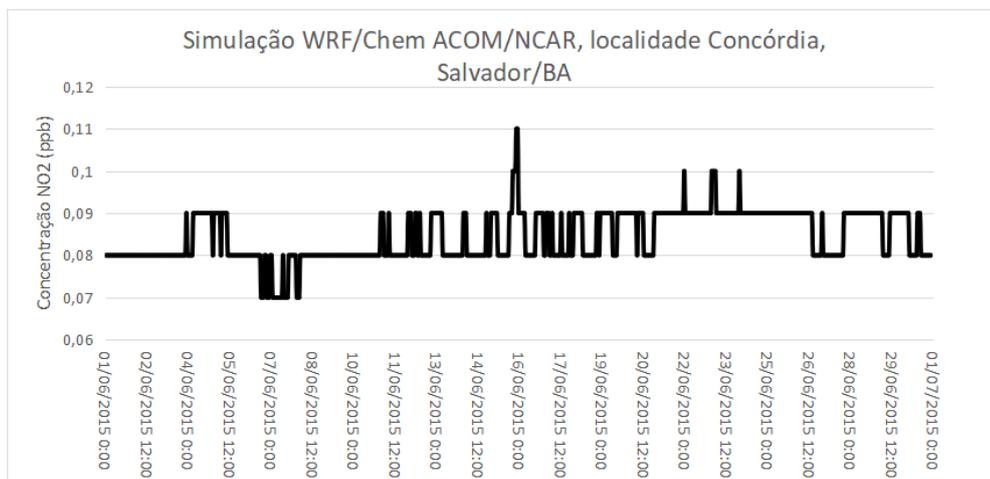


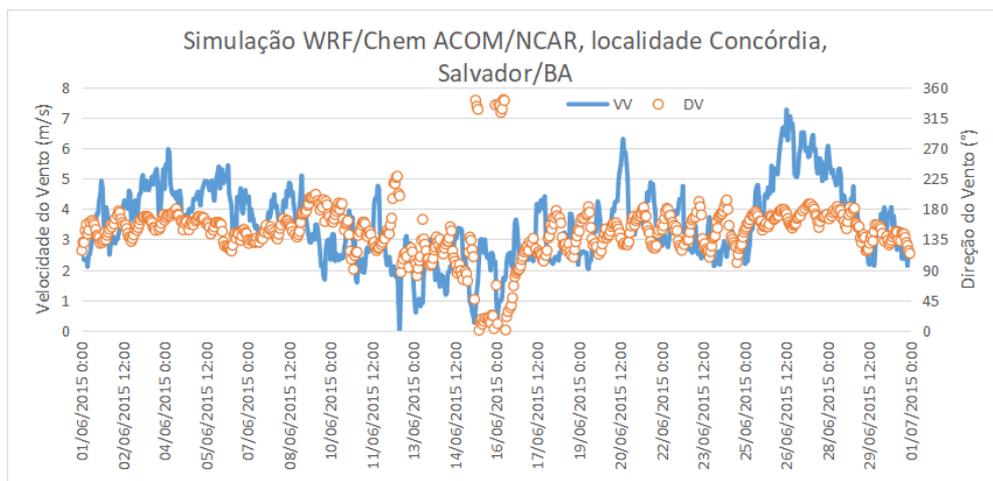
Fonte: Autor, 2021.

Para fins comparativos foram realizadas simulações com o modelo WRF/Chem para o NEB, a figura 8 mostra dados de concentração dos principais poluentes atmosféricos de uma atmosfera urbana, com destaque para o poluente monóxido de carbono e especificamente para o mês de junho/2015, apesar do padrão de concentração estar dentro do estimado, é possível identificar que os dias 15 e 16/06/2015 apresentaram os maiores valores de concentração dessa substância, provavelmente devido ao fato da influência das variáveis meteorológicas como velocidade e direção do vento, temperatura, e umidade relativa do ar.

Ainda sobre a figura 9a, os dados foram obtidos a partir da Estação de monitoramento de Concórdia na Região Metropolitana de Salvador, o dia 15 foi colocado em destaque pois apresentou o pico mais alto de concentração de CO, em relação aos outros dias do mês de junho, abrindo questionamentos para avaliar com mais detalhes este dia, e confrontar com dados meteorológicos, em busca de explicação para esta maior concentração. Situação esta também percebida para a concentração de NO₂, figura 9b, onde o dia 15/06/2021 foi o terceiro maior registro do mês, porém não tendo o mesmo destaque para a concentração de PM₁₀, figura 9c. Com o auxílio da figura 9d, percebe-se uma forte alteração da direção do vento de Sul/Sudeste para Norte nos dias 15 e 16/06/2015, que possivelmente tenha sido o causador das concentrações ligeiramente mais altas neste dias.

Figura 9: Níveis de concentrações de poluentes para a localidade de Concórdia, Salvador/BA no ano de 2015, utilizando o modelo de qualidade do ar WRF/Chem.



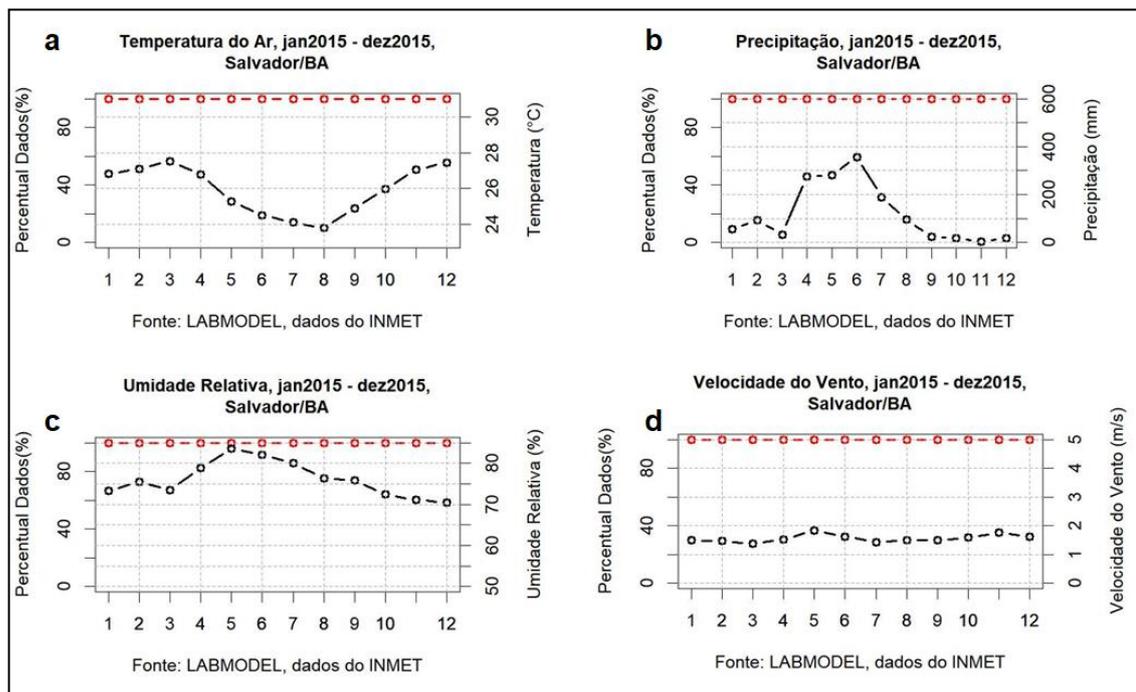


(d - Velocidade e Direção do Vento)

Fonte: Autor, 2021.

Sendo assim, ao confrontar os resultados observados na figura 9 e 10, que reúne os gráficos dos parâmetros meteorológicos tais como temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, direção e velocidade do vento para o período de janeiro a dezembro de 2015 em Salvador/BA. De modo a avaliar a precisão do modelo de qualidade do ar WRF/Chem, foi realizada uma simulação para todo o NEB, e extraído os dados para o mesmo ponto da estação de Concórdia, Salvador/BA. Assim como registrado na estação de monitoramento de Concórdia, o modelo WRF/Chem também estimou concentração de CO baixas e em torno de 0,1 ppm, que caracteriza um atmosfera não poluída para CO. No mês de junho/2015, com base na figura 13, os dados meteorológicos mostram temperaturas mais baixas (aproximadamente 24°C), Umidade Relativa acima de 85%, mês mais chuvoso do ano com aproximadamente 350mm, e ventos médios intensos acima de 1,5m/s. Características estas que favoreceram a dispersão dos poluentes e em especial para o CO, ver figura 10.

Figura 10: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade relativa (c) e velocidade do vento (d), para a cidade de Salvador/BA, ano 2015.



Fonte: LABMODEL, 2021.

De acordo com a figura 8, apresentado nesta seção, junho apresentou um índice mais elevado concentração de CO, contudo o referido mês apresentou uma concentração de monóxido inferior a estabelecida pela resolução do CONAMA que é de 9 ppm a cada 8 horas de exposição. Em termos comparativos, a figura 10a mostra a variação da o gráfico da temperatura do ar, onde apresenta os meses mais frios junho, julho e agosto/2015, sendo classificado para região Nordeste como a estação chuvosa. Vale destacar que a temperatura do ar para o trimestre consecutivo indicado, varia entre 24 e 25°C.

Na figura 10b, observa-se que a precipitação aumentou consideravelmente em junho, cerca de 350 mm, sendo este o mês mais chuvoso do ano de 2015. De acordo com Lima *et. al.*(2020) a deposição de substâncias são mecanismos que podem facilitar a diminuição da concentração de poluentes na atmosfera através da precipitação, uma vez que quadras chuvosas contribuem para que as partículas sejam arrastadas da atmosfera para a superfície terrestre, conhecida como deposição úmida, e deposição seca quando os poluentes são depositados na superfície somente com influência da gravidade.

A partir da figura 10c nota-se um aumento da umidade relativa entre os meses

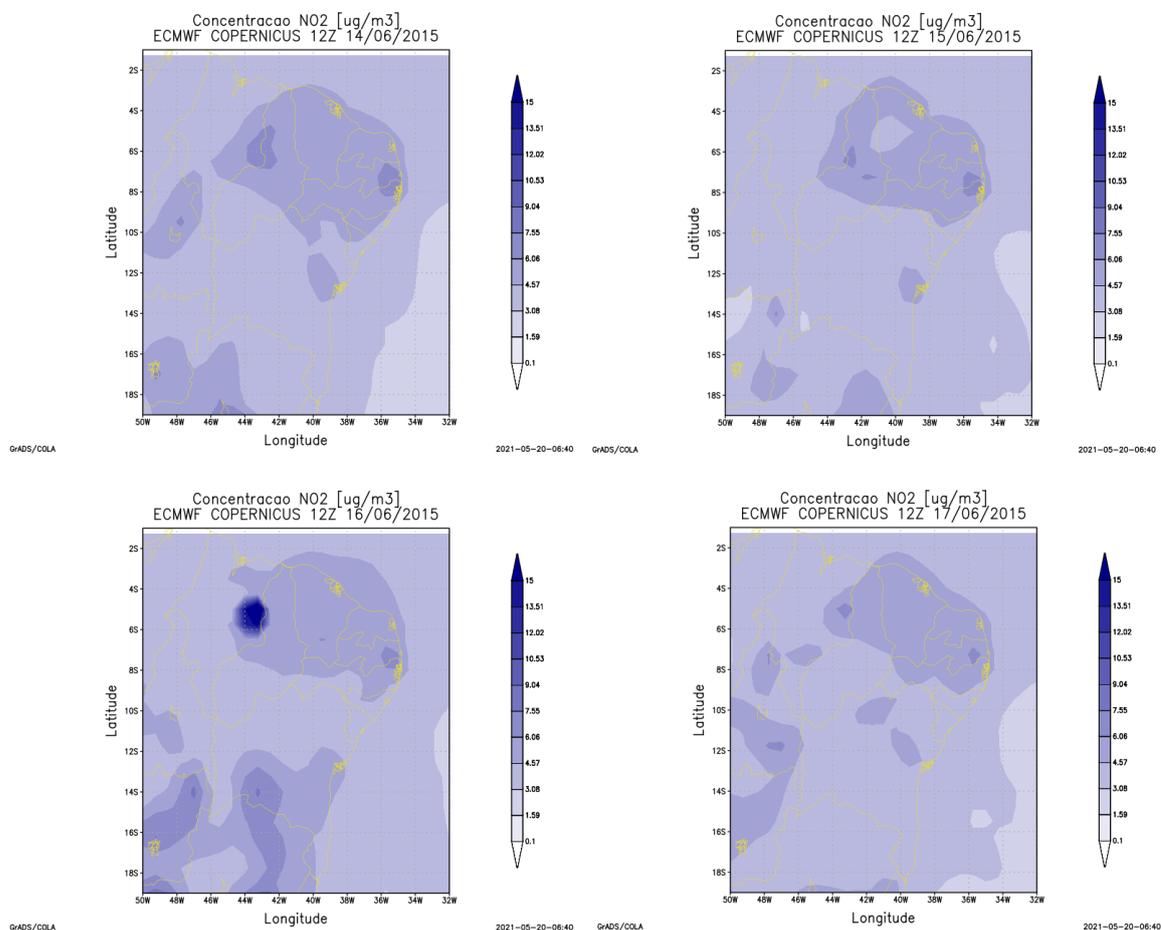
de maio, junho e julho, em resposta aos maiores índices pluviométricos. Associado a isto se destaca o episódio com maiores concentração de CO, apresentados Na figura 8, especialmente para o dia 16 as 0h. Ainda segundo Lima *et al.*(2020) esse aumento da concentração pode ser justificado pelos ventos menos intensos na região de acordo com o gráfico 10d.

Todos os fatores analisados podem ou não corroborar para um aumento ou diminuição na concentração de substâncias, mas de acordo com o gráfico 8 e 9a, o monóxido de carbono não apresenta mudanças bruscas de concentração, esse fator pode ser explicado pela pouca variação na velocidade do vento como pode ser visto em 10d. Segundo UNAL *et al.*, (2011) o aumento na velocidade do vento é responsável pela dispersão e transporte do poluente, para longe, ou perto da fonte emissora a depender da direção dos ventos, esse fato pode ser caracterizado pelo fato da atmosfera de Salvador-BA não ser poluída como preconiza a legislação CONAMA.

4.2. Análise da qualidade do ar utilizando a base de dados ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasting*) Copernicus.

Com base nos dados disponíveis do ECMWF Copernicus, para o poluente NO₂, nos horários das 12:00 horas. Na figura 11, pode-se avaliar espacialmente a qualidade do ar para o NEB, sendo possível observar um aumento da concentração para o mês de junho, especificamente para o dia 16, a figura, mostra a concentração de dióxido de nitrogênio para quatro dias, para mostrar a diminuição da concentração ao longo dos dias. É possível identificar um ponto mais escuro no estado da Paraíba, o que classifica uma concentração maior se comparado aos outros estados. Esse fato pode ser explicado pelo aumento da umidade relativa, de acordo com a figura 10c, há um aumento entre os meses de junho-julho, os valores médios correspondem a aproximadamente 80 e 85%, por ser uma estação chuvosa, favorece o aumento na concentração desses poluentes. A figura 10d, mostra que a velocidade do vento permanece quase constante para todo o período, podendo ser um fator que facilita o aumento da concentração na região da Paraíba.

Figura 11: Concentração NO₂ para NEB de acordo com os dados do ECMWF Copernicus



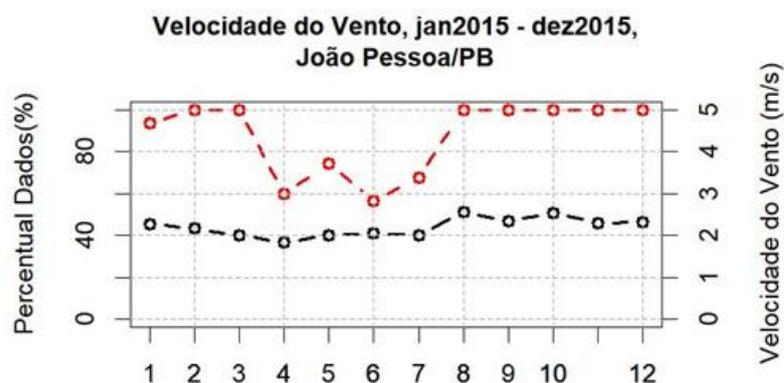
Fonte: Autor, 2021.

A figura 12, obtida a partir do modelo WRF/Chem, mostra a variabilidade dos dados meteorológicos para João Pessoa/PB, de modo a demonstrar a relação entre as variáveis meteorológicas e a concentração de NO₂, podemos notar que para o mês de junho de 2015, apresenta maiores valores de precipitação, umidade relativa, e menores valores para temperatura e velocidade do vento, com esses fatores é possível que haja aumento na concentração de poluentes, uma vez que o vento é responsável pela dispersão das substâncias.

De acordo com um estudo realizado por Freitas *et al.* sobre a concentração de dióxido de nitrogênio (NO₂) para o período de 2005-2015 na região Nordeste foi identificado que houve diminuição da concentração dessa substância para o período de setembro a dezembro. Ainda de acordo com o autor, o período que foi

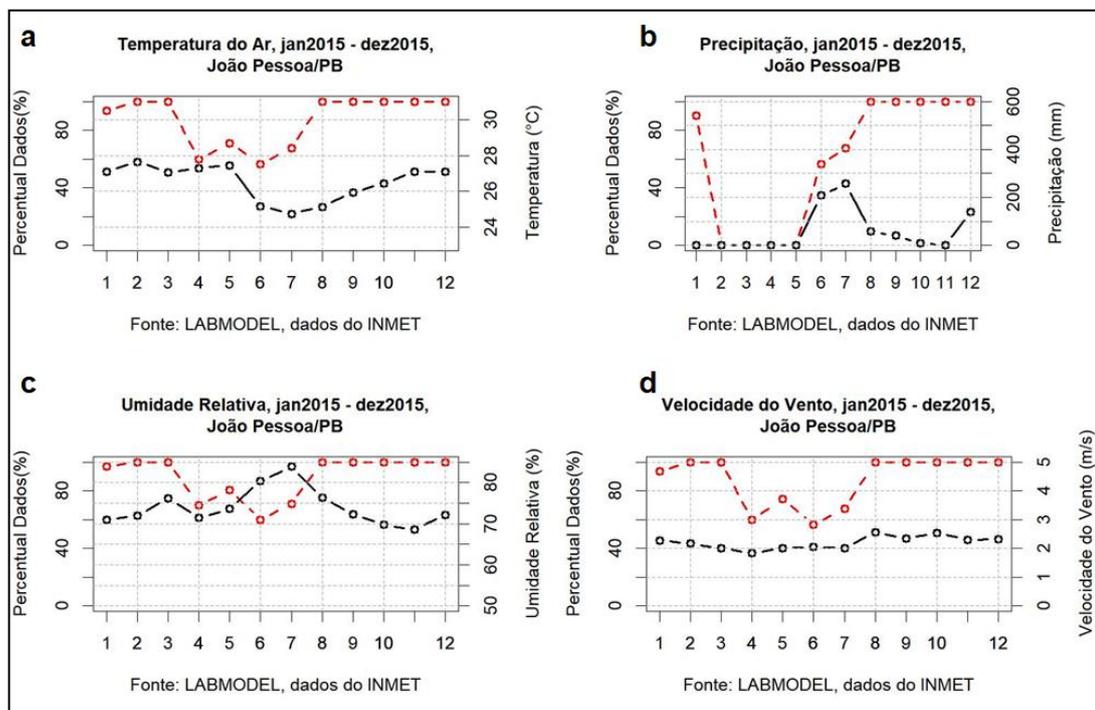
identificado com tendência de aumento foram os meses entre maio e setembro (início da primavera), onde atingiu o maior valor da variável. Pode-se observar que na figura 13, a partir do mês de maio há um aumento da umidade relativa, variável que pode influenciar no aumento da concentração de poluentes, além disso, outro fator, é a velocidade do vento que pode ser visto na figura 11, esta variável se encontra menor se comparado ao mês de agosto e setembro.

Figura 12: Variação mensal da velocidade do vento (d), para a cidade de João Pessoa/PB, ano 2015.



Fonte: LABMODEL, 2021.

Figura 13: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade relativa (c) e velocidade do vento (d), para a cidade de João Pessoa/PB, ano 2015.



Fonte: LABMODEL, 2021.

A temperatura do ar como pode ser visto em 13a, não é favorável ao aumento da concentração, pois de acordo com Melkonyan *et.al.* (2012) a temperatura elevada pode transformar poluentes primários em secundários, e neste caso há uma diminuição da temperatura para o período de julho a agosto, classificado pela quadra chuvosa da época, que pode ser explicada pela figura 13b, entre os meses de junho-julho, há um aumento considerável da precipitação.

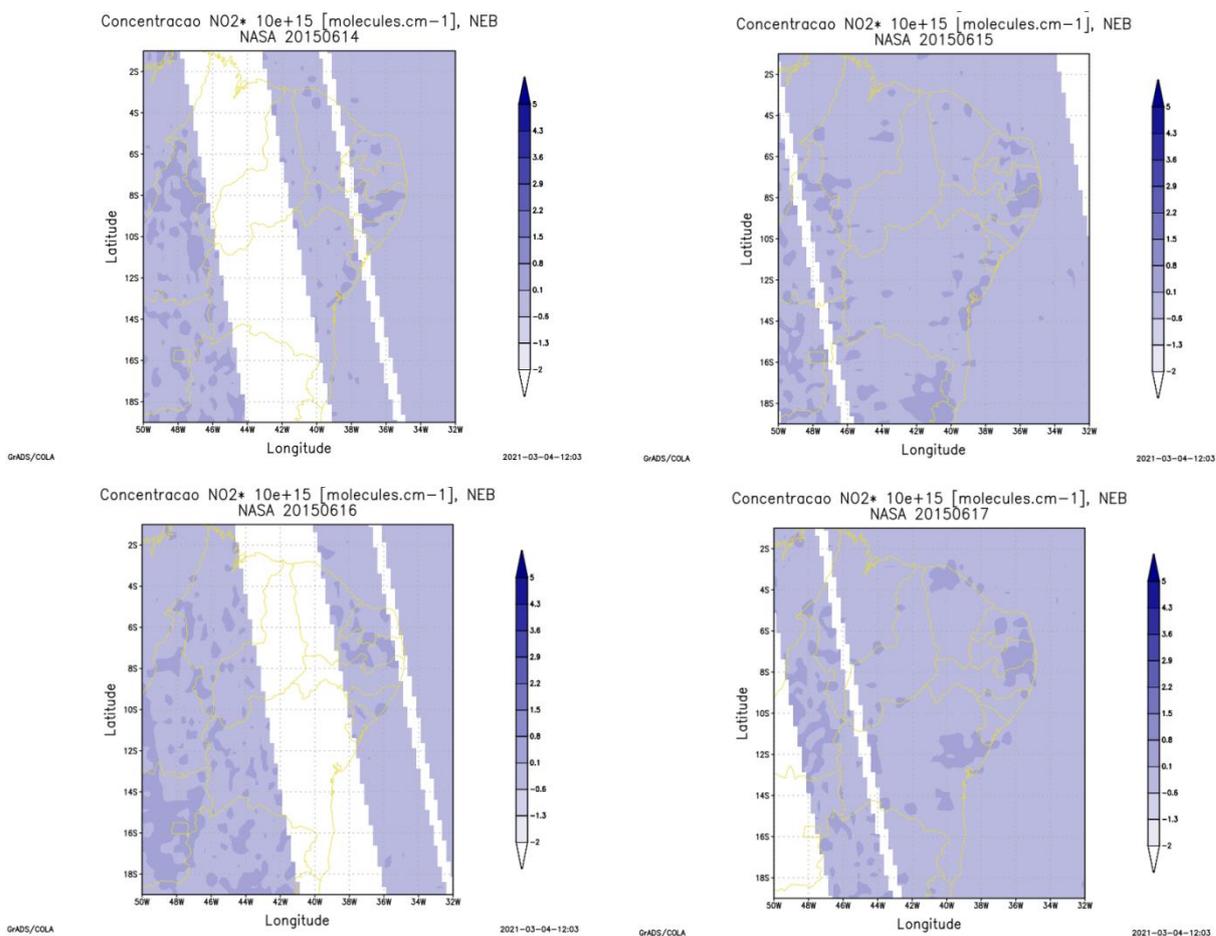
Como visto, a figura 11 explica a dispersão do NO₂ ao longo dos quatro dias, para a cidade da Paraíba, já na figura 16d a velocidade do vento não variou muito, com isso a estabilidade atmosférica afeta o movimento vertical do ar a convecção e a turbulência são fatores que aumentam quando o ar é considerado instável, podendo também ser inibidos quando o ar é estável (ZANNETI, 1990).

4.3. Análise da qualidade do ar utilizando o satélite da NASA

O satélite dispõe de informações da estimativa dos poluentes monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio, como mostra a figura 14, esta corresponde aos dados da NASA para os dias 14 a 17 de junho/2015; é possível observar que ao longo do dia, a concentração do NO₂ no estado de Pernambuco se encontra maior comparado aos outros estados, porém nota-se que este poluente está se dispersando ao longo do Estado da Paraíba e estes dados podem ser confrontados com a figura 18, que mostra a dispersão do dióxido de nitrogênio.

A concentração de NO₂ apresenta falhas por conta da faixa de abertura do satélite orbital, como pode ser constatado na figura 14 nos dias 14 e 16 de junho, as falhas podem surgir devido a faixa de abertura e também ao tempo de revisita para determinadas regiões, situação esta que explica a falta de registro em algumas regiões.

Figura 14: Concentração NO₂ para o NEB de acordo com os dados da NASA

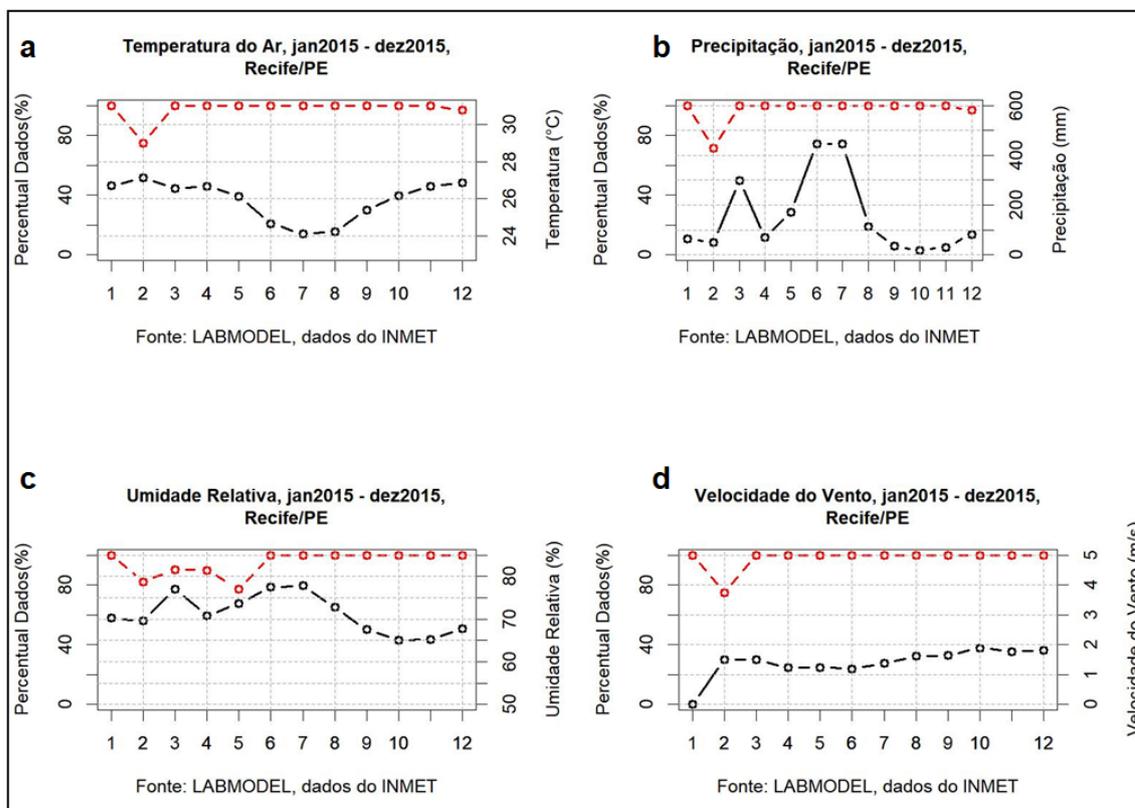


Fonte: Autor, 2021.

Ainda sobre a dispersão de NO₂ ao longo do estado de Pernambuco, pode-se notar, que uma provável explicação para esse processo, seria o aumento significativo da precipitação entre os meses de junho e julho, ver figura 15, variável meteorológica esta que serve como deposição úmida e consequentemente diminuição da concentração de material particulado.

Figura 15: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade

relativa (c) e velocidade do vento (d), para a cidade de Recife/PE, ano 2015.

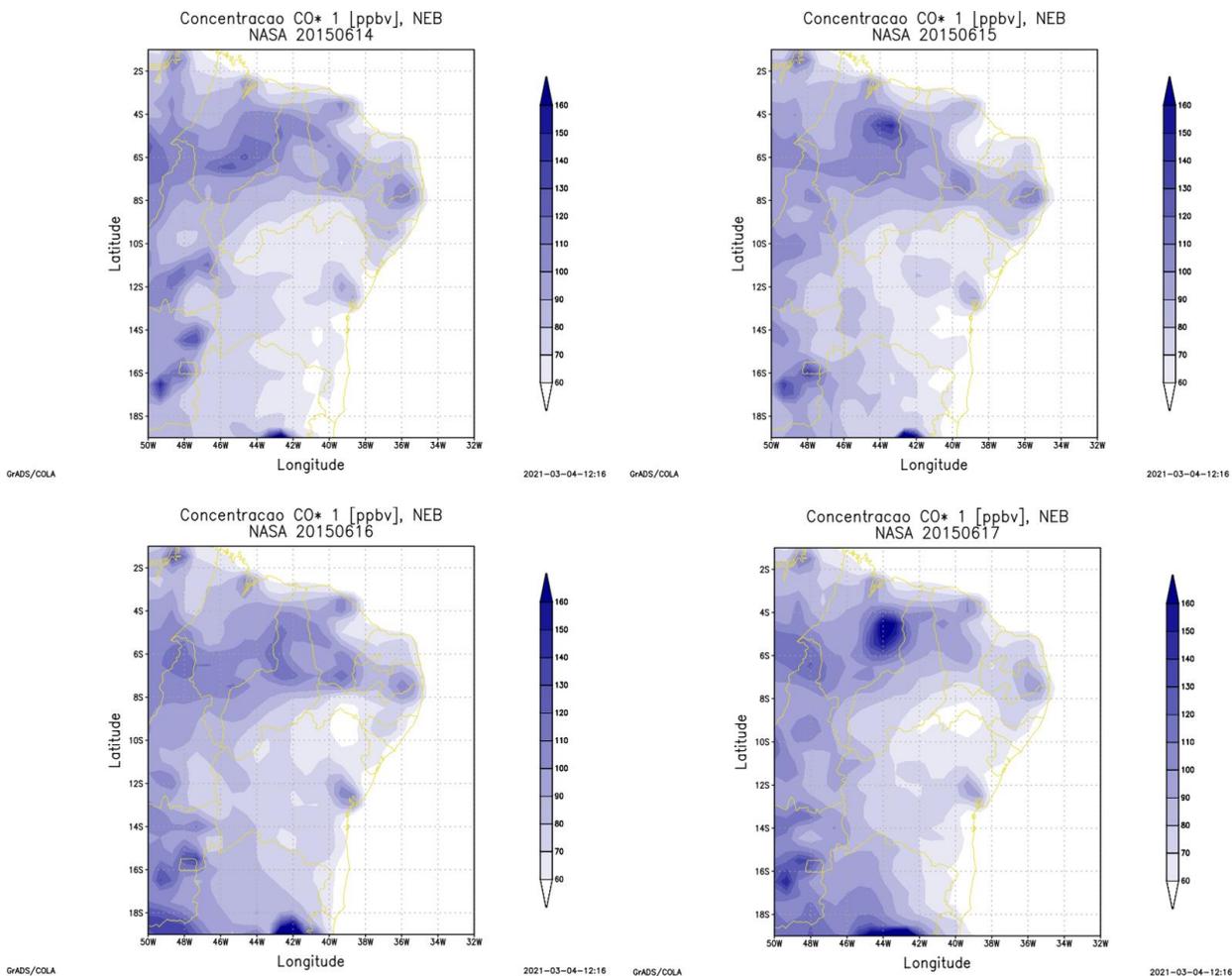


Fonte: LABMODEL, 2021.

Além dos dados das concentrações de dióxido de nitrogênio, foram obtidos dados referentes ao CO. A figura 16 mostra um possível transporte do poluente monóxido de carbono demonstrado na sequencia de imagens referentes aos 4 dias (14, 15, 16 e 17/06/2015), neste período ocorre uma diminuição da concentração do monóxido de carbono especificamente no estado da Paraíba, esse fator pode ser remetido ao aumento da precipitação no Estado, para o mês de junho representado pela linha azul na figura 17.

Ainda com o auxílio da figura 16 é possível observar os máximos de concentração de no interior do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Este fato pode ser explicado pela linha vermelha do gráfico 17, sobre a influência da diminuição da precipitação corrobora para a intensificação da concentração do CO.

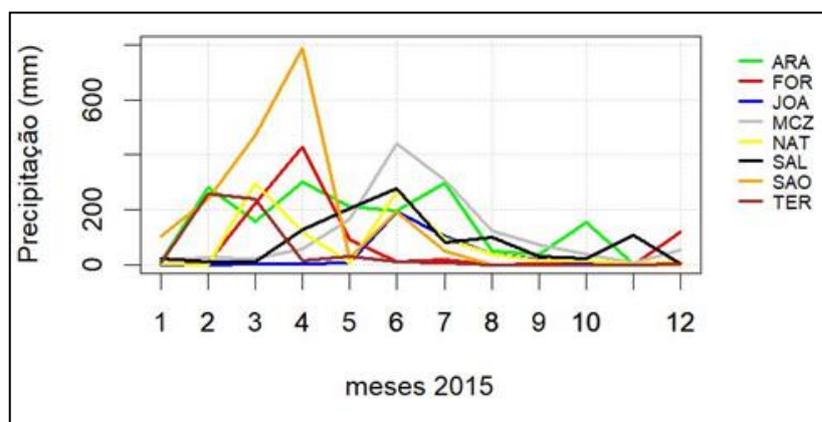
Figura 16: Concentração CO para o NEB de acordo com os dados da NASA



Fonte: Autor, 2021.

Dessa maneira, pode-se afirmar que a influência da precipitação pode aumentar ou diminuir a concentração das substâncias, ao analisar a figura 17 podemos ver que no mês de junho para a capital João Pessoa/PB aumenta em aproximadamente 200 milímetros, em contrapartida em Fortaleza essa precipitação é de aproximadamente 50 milímetros, classificando um período mais seco.

Figura 17: Acumulado mensal de precipitação pluviométrica nas capitais do NEB.



Fonte: LABMODEL, 2021.

4.7. Dados obtidos do modelo WRF/Chem.

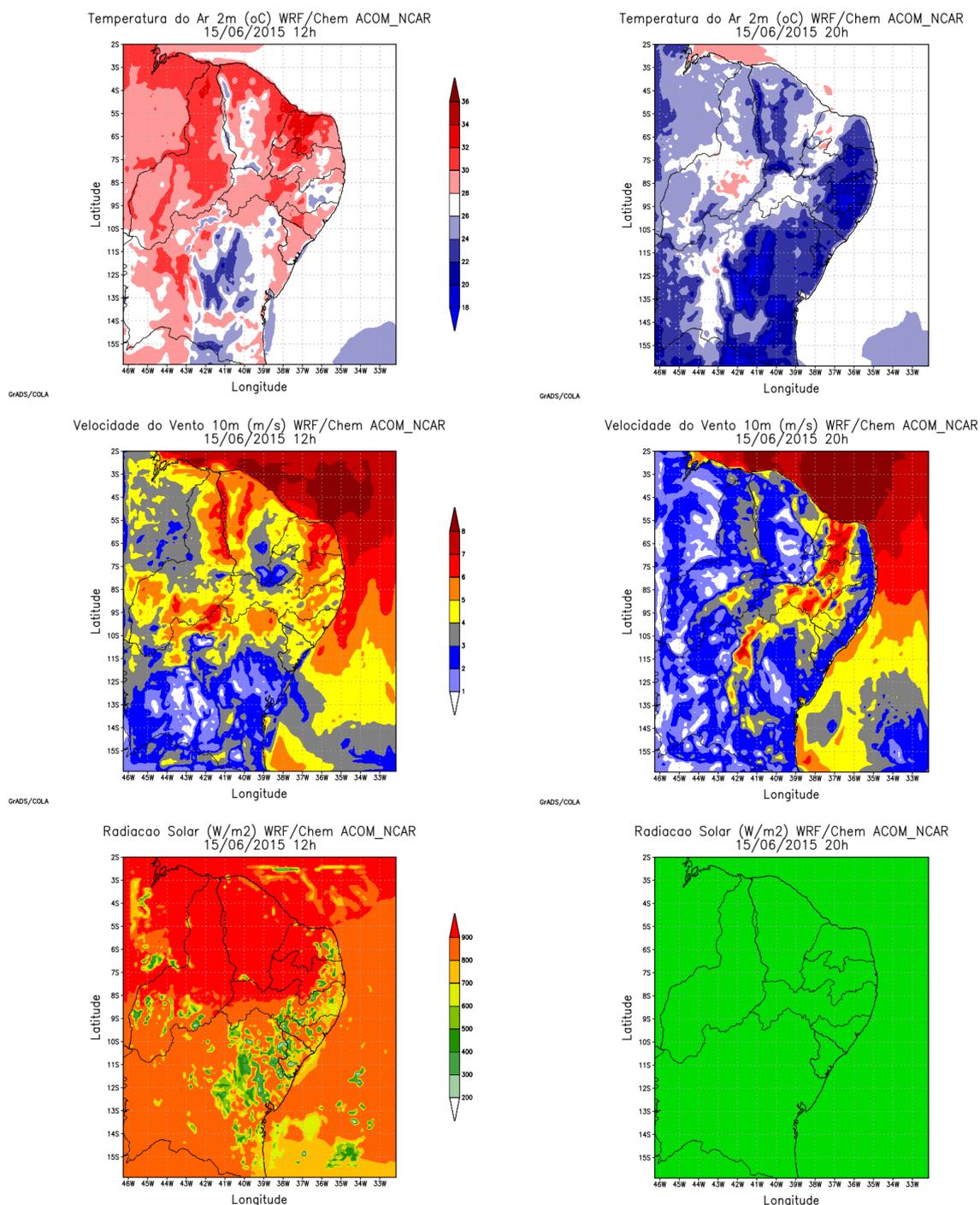
Os resultados do modelo WRF/Chem, são referente as simulações realizadas com a base de dados de emissão ACOM/NCAR. Pode-se notar a variação das concentrações de CO (Monóxido de Carbono), NO (Monóxido de Nitrogênio), VV (Velocidade do Vento), DV (Direção do Vento), Temp (Temperatura do Ar), para todas as capitais dos estados do NEB (Maceió-MCZ, Aracaju-ARA, Fortaleza-FOR, João Pessoa-JOA, Natal-NAT, Salvador-SAL, São Luis-SAO, Teresina-TER, Concórdia-CON).

De modo a tornar a discussão mais eficiente, será analisado especialmente a condição meteorológica e qualidade do ar, para o dia 15/06/2015. Tendo em vista que este dia em específico, foi o que apresentou maior concentração de CO, medido pela estação de monitoramento de Concórdia - Salvador/BA.

Com base na figura 18, em especial a parte litorânea do NEB por se encontrar as capitais, pode-se argumentar a maior intensidade de radiação solar no período diurno (às 12h), variando entre 600W/m² (litoral Leste do NEB) e 900W/m² (litoral Norte do NEB), e naturalmente ausência de radiação no período noturno (às 20h). Em reflexo a variabilidade de radiação solar, pode-se notar temperaturas mais elevadas no litoral Norte do NEB (da ordem de 32°C) e temperatura mais amena no litoral Leste do NEB (da ordem de 28°C), e havendo diminuição para o período noturno de aproximadamente 6°C às 20h. Seguindo a mesma tendência, a velocidade do vento para o período diurno também mostrou ventos mais intensos no

litoral Norte (da ordem de 6m/s) em comparação ao litoral Leste (da ordem de 5m/s) do NEB, e também da mesma forma apresentou diminuição da intensidade do vento para o período noturno, da ordem de 3m/s abaixo.

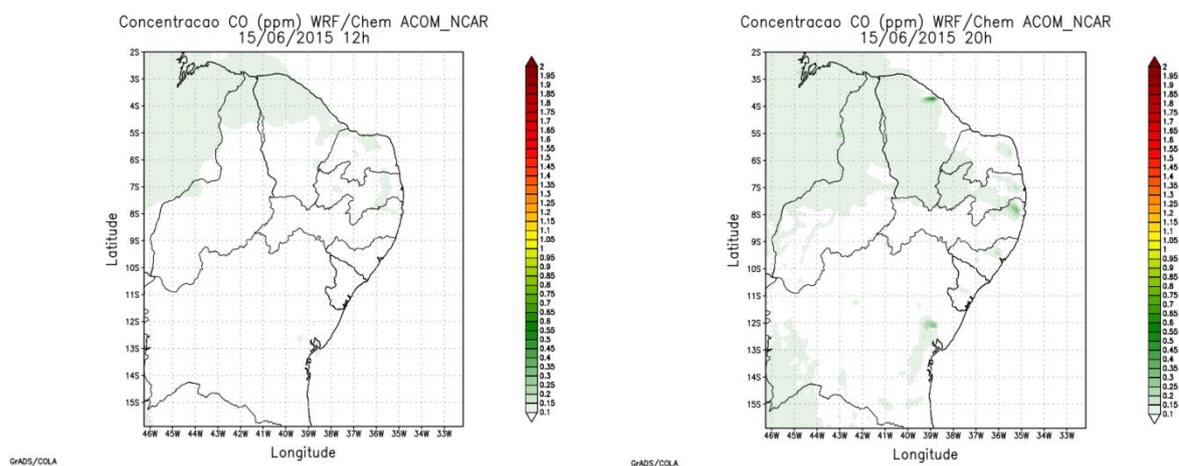
Figura 18: Condição meteorológica do NEB (Temperatura do Ar, Velocidade do Vento e Radiação Solar), para o dia 15/06/2015 para as 12h e 20h, resultados das simulações realizadas com o modelo WRF/Chem sistema ACOM/NCAR.

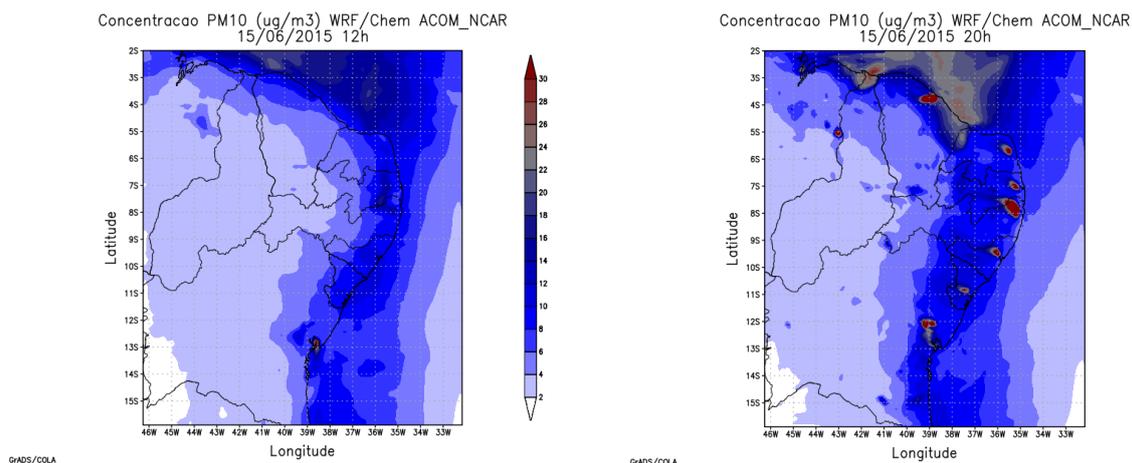


Fonte: Autor, 2021

De modo a avaliar a variabilidade da concentração do poluentes atmosféricos no NEB, com o auxílio da figura 19, ficou evidente a diminuição da concentração de CO e PM10 no período diurno, devido principalmente a maior eficiência da dispersão dos poluente por conta da maior velocidade do vento. Fato este que explica os maiores valores de concentração durante do período noturno. Vale destacar também, a forte influência da fontes de emissão antropogênicas das cidades do NEB, ver figuras 07 e 19, onde claramente é possível notar as maiores concentrações próximas a fonte de emissão antropogênicas. Mesmo com a contribuição de emissão antropogênicas nos grandes centros urbanos do NEB, os índices de poluição ainda estão abaixo do estabelecido pelo CONAMA. Devido principalmente as condições meteorológicas favorecem a dispersão dos poluentes, apesar da intensa emissão veicular nas cidades do NEB. Ou seja, com o auxílio das diferentes bases de dados, e em especial as simulações realizadas com o modelo WRF/Chem, pode-se afirmar que não houve mudanças bruscas nas concentrações, e classificando assim, como uma atmosfera não poluída.

Figura 19: Variação espacial da concentração do CO (Monóxido de Carbono) e PM10 (Material Particulado 10 μ m) para o NEB, obtidos a partir de simulações com o modelo WRF/Chem, sistema ACOM/NCAR.





Fonte: Autor, 2021.

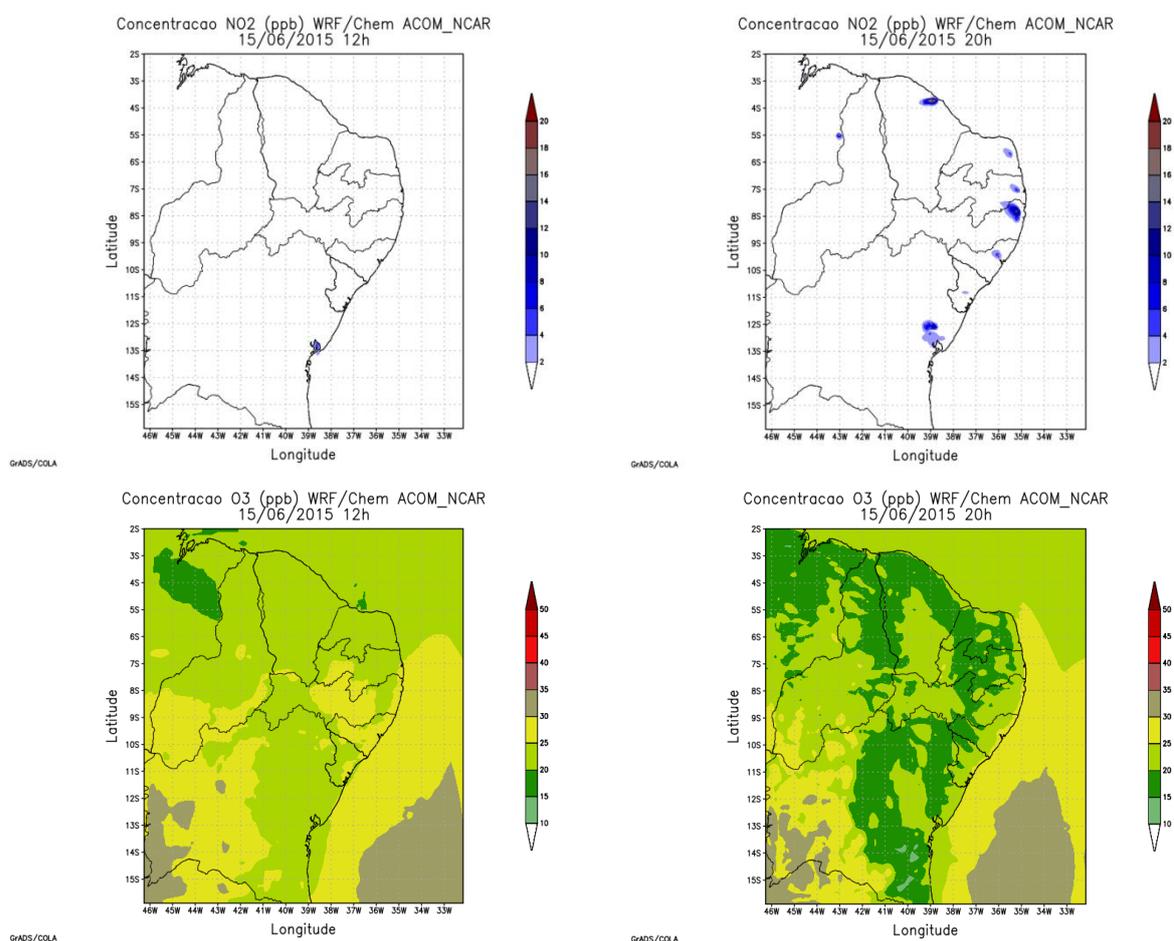
Vale destacar que os ventos Alíseos são os principais responsáveis na faixa litorânea do NEB, pelos ventos mais intensos e conseqüentemente maior dispersão dos poluentes, e direção predominante do vento de SE. De acordo com um estudo realizado por BERNARDO & MOLION (2000) sobre a variabilidade da direção e velocidade do vento na cidade de Maceió/AL durante os anos de 1991-1996, que durante o período chuvoso que vai de abril a julho, a direção preferencial do vento durante o dia foi de sul-sudeste (SSE), apresentando também as direções sul (S) e sul-sudoeste (SSW) e as velocidades horárias médias em torno de 4-4,5 m/s. Já durante o período noturno a predominância foi de norte (N) e velocidades médias aproximadas de 0-1 m/s.

Ainda de acordo com os autores a intensidade e direção do vento foram estudadas para três diferentes períodos do ciclo anual, classificadas como: dezembro-março, abril-julho e agosto-novembro, BERNARDO & MOLLION (2000) concluíram que durante o ciclo de abril-julho as velocidades máximas do vento encontradas foram inferiores a 4 m/s entre 13 e 15 horas enquanto que durante a noite os mínimos não excederam os 0,5 m/s.

Já a figura 20, mostra a variação espacial da concentração de NO₂ e O₃, com o objetivo de avaliar as concentrações de O₃ troposférico que é um poluente nocivo à saúde e também sendo o gás do efeito estufa (atuando na absorção da radiação de onda longa terrestre, na janela atmosférica). Para o dia em questão, 15/06/2015, os níveis de concentração de O₃ troposférico para o NEB, estiveram abaixo da concentração de 80ppb (nível de concentração que determina a atmosfera poluída), sendo registrado o máximo de 35ppb na região Oeste da Bahia. Portanto pode-se

afirmar que apesar da emissões antropogênicas nos grandes centros urbanos, a eficiente dispersão dos poluentes, explicados por ventos alíseos intensos e concentrações baixas de NO_2 (da ordem de 4ppb período diurno e 8ppb no período noturno) que é um precursor de formação do O_3 .

Figura 20: Variação espacial da concentração do NO_2 (Dióxido de Nitrogênio) e O_3 (Ozônio) para o NEB, obtidos a partir de simulações com o modelo WRF/Chem, sistema ACOM/NCAR

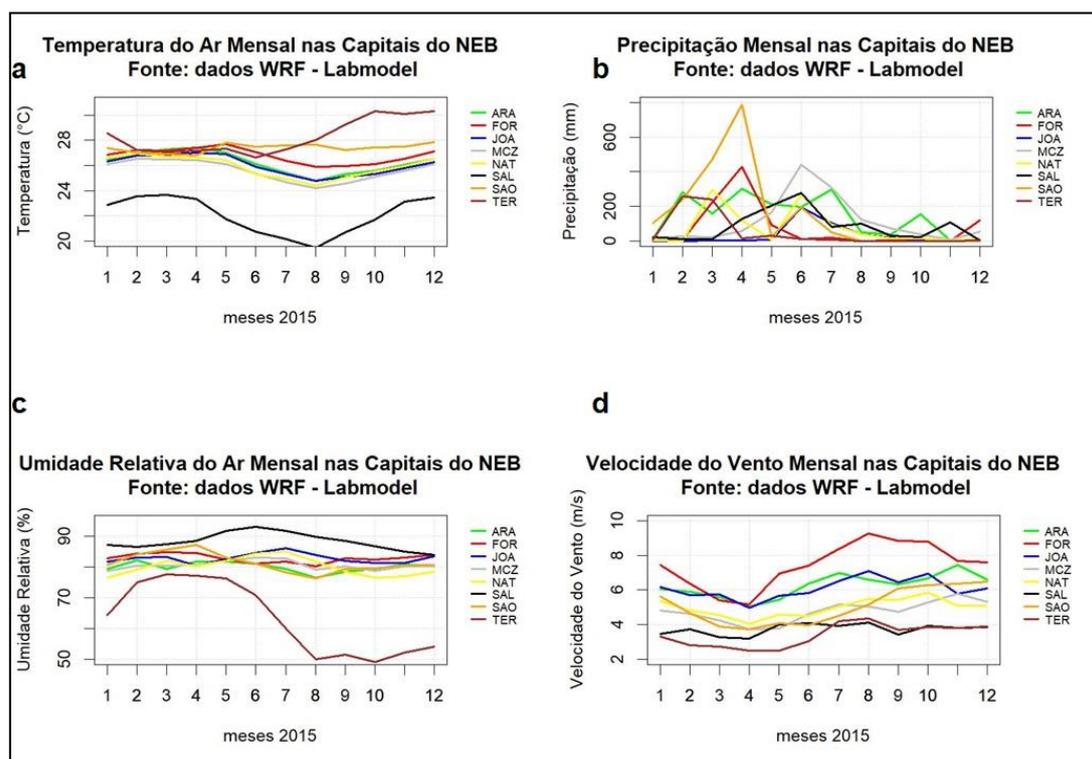


Fonte: Autor, 2021.

Desta feita, dando maior ênfase as capitais do NEB, a figura 21 mostra de forma comparativa as variáveis meteorológicas para todos os meses do ano de 2015. Fica evidente ao analisar a figura 21a, que Salvador/BA é a capital mais fria do NEB (em média 24°C no verão e 20°C no inverno), já Teresina/PI é a capital mais quente

do NEB (em média 30°C no verão e 27°C no inverno), as demais cidades do NEB oscilam entre 27°C e 25°C. No tocante a precipitação e umidade relativa a cidade de Salvador/BA se destaca com os maiores valores, provavelmente associado com a maior ocorrência de entrada de frente frias, como constatado pelo estudo de BERNARDO & MOLION, 2000, e sendo Teresina/PI a mais seca das capitais. Bem como os menores índices de intensidade do vento são conferidos à Salvador/BA e Teresina/PI (variando de 3 a 4m/s). Portanto, que a cidade de Salvador/BA apresenta características diferenciadas de baixas temperaturas, bastante umidade e ventos fracos, condições que dificultam a dispersão dos poluentes e consequentemente maiores concentrações de poluentes.

Figura 21: Variação mensal da Temperatura do ar (a), Precipitação (b), Umidade relativa (c) e velocidade do vento (d), para as capitais do NEB, ano 2015, simulações utilizando o modelo atmosférico WRF.

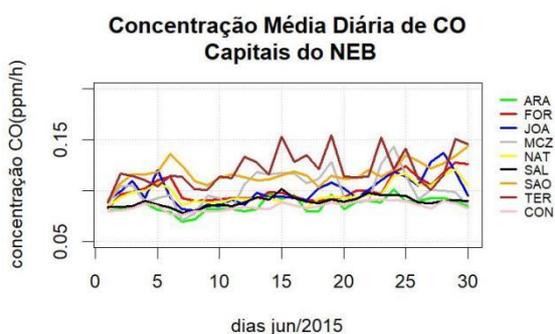


Fonte: LABMODEL, 2021.

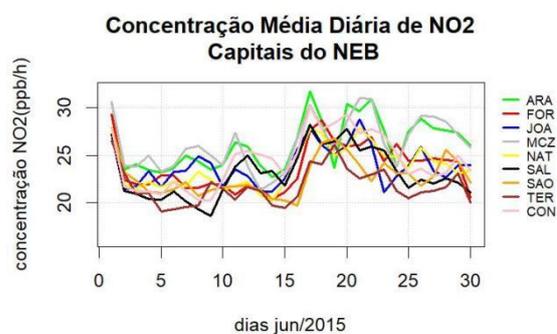
Na tentativa de avaliar a composição da atmosfera nas capitais do NEB, foram realizadas simulações com o modelo de qualidade do ar WRF/Chem, utilizando o sistema ACOM/NCAR, para todo o mês de junho de 2015, ver figura 22. Os principais resultados dão conta que as cidades de Maceió/AL e São Luis/MA, figura 22a, foram as que apresentaram maiores concentrações de CO (aproximadamente

0,15ppm), porém não suficientes para ultrapassar/igualar os índices CONAMA. Já para os poluentes NO_2 e O_3 , figuras 22b e 22c, os destaques são para as cidades de Maceió/AL e Aracaju/SE, que apresentaram maiores concentrações, e novamente não sendo suficiente para serem classificadas com cidades poluídas para estes compostos (30ppb e 20ppb, respectivamente). Para o material particulado de 10μ (PM10), figura 22d, as cidades de Maceió/AL e Teresina/PI apresentaram maiores concentrações (aproximadamente $3\mu\text{g}/\text{m}^3$), que também não ultrapassa/igualam ao nível estabelecido pelo CONAMA. Apesar de temperaturas mais baixas novamente registradas para a cidade de Salvador/BA (incluindo estação a localidade da estação Concórdia-Salvador/BA), ver figura 22f, a intensidade do vento esteve na média ou superiores (dias 27 e 28/06) as demais cidades do NEB, ver figura 22e, o que remete a hipótese que a intensidade do vento por intermédio da dispersão condiciona a qualidade do ar, pois as concentrações dos poluentes estimada para Salvador/BA, não são as maiores registrada, mesmo sendo a cidade com maior frota veicular, ver figura 5.

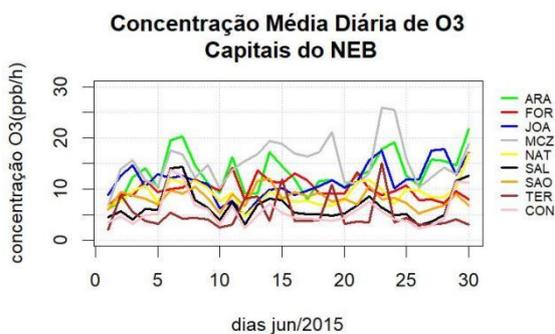
Figura 22: Concentração média de CO (a), NO_2 (b), O_3 (c), PM10 (d), Velocidade do Vento (e), e Temperatura do Ar (f), para as capitais do NEB, ano 2015, simulações WRF/Chem com sistema ACOM/NCAR.



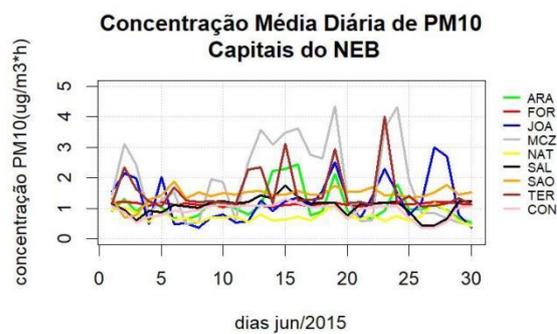
(a)



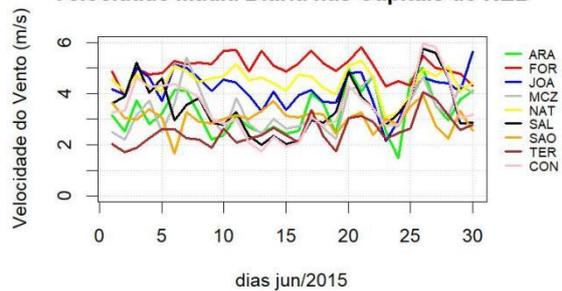
(b)



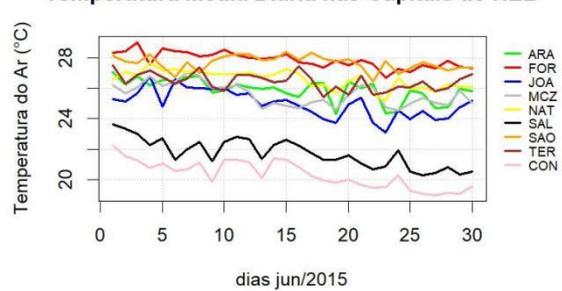
(c)



(d)

Velocidade Média Diária nas Capitais do NEB

(e)

Temperatura Média Diária nas Capitais do NEB

(f)

Fonte: LABMODEL, 2021.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, foi observado que todas as capitais do Nordeste Brasileiro, encontram-se dentro dos padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA. Apesar da capital Salvador/BA apresentar a maior frota veicular do NEB, não foi a cidade mais poluída com base nas estimativas realizadas com o WRF/Chem, ou seja, não existindo uma relação direta em aumento da frota veicular e aumento da concentração de poluentes. O modelo de qualidade do ar WRF/Chem representou a variabilidade temporal e espacial das concentrações dos poluentes condicionadas pelas variáveis meteorológicas. Para o período de estudo e poluentes avaliados, as concentrações estiveram dentro dos padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA, tendo um destaque para a cidade de Maceió/AL, Teresina/PI, São Luis/MA registraram as maiores concentrações de CO, com destaque para a cidade de Maceió/AL que para todos os poluentes analisados esteve na maioria dos casos com a maiores concentrações entre as cidades do NEB. As imagens de satélite, facilitaram a visualização da dispersão e/ou concentração dos poluentes, em conjunto com as simulações obtidas através do WRF/Chem esses dados foram validados.

Os testes com os inventários de emissões que serviram como dados dos compostos químicos de entrada do WRF/Chem, determinou que o sistema ACOM/NCAR apresentou melhores resultados quando comparado ao PREP-CHEM-SRC-1.5, em termos de localização das fontes de emissão antropogênicas e muita dificuldade na representação da emissão por queima de biomassa. Diferente do sistema ACOM/NCAR o sistema PREP-CHEM-SRC-1.5 não oferece a opção de gerar a emissão da concentração de fundo e condição de borda para os dados químicos, diminuindo ainda mais a qualidade das simulações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, L.S., CANDEIAS, A.L., TAVARES, J.R. Análise de mudanças na poluição atmosférica e sua relação com o isolamento social em função da pandemia da COVID-19 no Nordeste Brasileiro. V.33. 2021.

BECHLE, M. J.; et al. Remote sensing of exposure to NO₂: satellite versus ground-based measurement in a large urban area. *Atmos. Environ.*, v. 69, p. 345-353, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.046> .

CETESB, Relatório de Qualidade do ar. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wpcontent/uploads/sites/28/2013/12/RQAR-2015.pdf>>. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente. CETESB, 2015. Acesso em: 20 de mar 2021.

CETESB, Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2018. Secretaria do Meio Ambiente. ISSN 0103-4103, Sao Paulo.

CIESLINSKI, J.E.F. Estudo da emissão e do controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. UNESP. 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/>>. Acesso em: 06 de abr 2021.

MMA - Ministério do Meio Ambiente, Cidades e Estados. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al.html>> Acesso em: 04 abr 2020.

CORREIA, J. G. A. Estudo Preliminar de NO₂ na Atmosfera da Cidade de João Pessoa. 2011. 54 f. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2011.

CHAPMAN, E.G.; GUSTAFSON JR., W.I.; BARNARD, J.C.; GHAN, S.J.; PEKOUR, M.S.; FAST, J.D. Coupling aerosol-cloud-radioactive processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of large point sources. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 9, p. 945-964, 2009.

CHEN, D.; LI, Q.; STUTZ, J.; MAO, Y.; ZHANG, L.; PIKELNAYA, O.; TSAI, J.Y.; HAMAN, C.; LEFER, B.; RAPPENGLÜCK, B.; ALVAREZ, S.; NEUMAN, J.A.; FLYNN, CUCHIARA, G.C.; LI, X.; CARVALHO, J.; RAPPENGLÜCK, B.; Intercomparison of planetary boundary layer parametrization and its impacts on surface ozone concentration in the WRF/Chem model for a case study in Houston/Texas. *Atmospheric Environment*, v. 96, p. 175-185, 2014.

DENATRAN - Estatísticas frota de veículos. Disponível em: <<https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8552-estat%C3%ADsticas-frota-de-ve%C3%ADculos-denatran.html>> Acesso em: 08 abr 2020.

DIAS, H. L. F. SOUSA, F.F. de M. SULIANO, F. M. BERTONCINI, P.B. Estimativa de emissões de poluentes atmosféricos veiculares, integrada a modelagem da demanda por viagens. Fortaleza-CE. 2016.

EPA – U.S. Environmental Protection Agency. AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Volume I. Fifth Edition. Chapter 1. Section 1.3: Fuel Oil Combustion. Maio, 2010.

FREITAS, I. G.F.; ALVES, J.C.S.; MARIANO, E.V.C.; MARIANO, G. L. Comportamento do Dióxido de Nitrogênio Sobre a Região Nordeste do Brasil e sua Relação com Variáveis Meteorológicas. Ciência e Natura v.40, Edição Especial: X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2018.

GERMANO, A. S. Estimativa da concentração de poluentes (CO, NO e NO₂) de origem veicular na cidade de Maceió, utilizando o modelo WRF/chem. Universidade Federal de Alagoas. 2014. Instituto de Energia e Meio Ambiente. 1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. 2014.

GOLDEMBERG, J.; BARBOSA, L. M. A legislação ambiental no Brasil e em São Paulo. Revista Eco 21, Rio de Janeiro, n.96, nov. 2004. Disponível na Internet em: <www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=954>. Acesso em: 20 fev. 2020.

GUERRA, F.P.; MIRANDA, R.M. (2011) Influência da meteorologia na concentração do poluente atmosférico PM_{2,5} na RMRJ e na RMSP. Congresso

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, Índices teóricos da radiação UV-B, para as cidades Brasileiras. 2006. Disponível em: <<http://www.dge.inpe.br/ozonio/radiauvb.html>>. Acesso em: 21 fev 2020.

IRIART P.G., FISCH G. Uso do modelo WRF-CHEM para a simulação da dispersão de gases no Centro de Lançamento de Alcântara. Revista Brasileira de Meteorologia. 31(4):610-625. 2016.

J.; ROBERTS, J.M.; NOWAK, J.B.; GOUW, J.; HOLLOWAY, J.; WAGNER, N.L.; VERES, P.; BROWN, S.S.; RYERSON, T.B.; WARNEKE, C.; POLLACK I.B.; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Transporte & Desenvolvimento: Transporte Metroferroviário de Passageiros. Brasília: CNT, 2016. Disponível em: <<http://cnt.org.br>>. Acesso em: 01 abr 2020.

Kuik, F.; Lauer, A.; Churkina, G.; van de Gon, H. A. C. D.; Fenner, D.; Mar, K. A.; Butler, T. M. Air quality modelling in the Berlin-Brandenburg region using WRFChem v3.7.1: sensitivity to resolution of model grid and input data. Geoscientific Model Development, v. 9, p. 4339-4363, 2016.

LIMA, J.R. , SALGADO, B.C, CAVALCANTE, F.S., OLIVEIRA, M.L. , ARAÚJO, R.S. Avaliação da poluição atmosférica na área do distrito industrial de Maracanaú (CE), Brasil. Eng Sanit Ambient, v.25 n.3, maio/jun 2020, 521-530.

LYRA, D.G.P. (2006). A influência da meteorologia na dispersão dos poluentes atmosféricos da Região Metropolitana de Salvador. Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. 14. Anais.

MELKONYAN, A.; KUTTLER, W. Long-term analysis of NO, NO₂ and O₃ concentrations in North Rhine-Westphalia Germany. Atmospheric Environment, v. 60, p. 316-326. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.048>. (2012)
WRF-CHEM simulation of NO_x and O₃ in the L.A. basin during CalNex2010. Atmospheric Environment, v. 81, p. 421-432, 2013.

MMA - Ministério do Meio Ambiente, Brasileiro de Gestão Ambiental, 2. Anais. Indicadores Ambientais Nacionais. Disponível em:
<<http://dados.mma.gov.br/dataset/indicadores>>. Acesso em: 18 fev 2020.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: Ano Base 2018 – Relatório Final. Brasília. 2018. Disponível em:
<https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao>. Acesso em: 31 mar 2020.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. PRONAR. Ações para o fortalecimento do PRONAR. 2009. Disponível em:<https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/promot_163.pdf>. Acesso em: 01 abr 2020.

PROCONV/ PROMOT. Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores. Coleção meio Ambiente. 3ª edição. Disponível em:
< <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve> f>. Acesso em: 02 abr 2020.

PRONAR - PROGRAMA NACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE DO AR. Fonte: Disponível em:<<https://www.mma.gov.br/estruturas/arquivos/pronar.pdf>>. Acesso em: 01 abr 2020.

PROMOT - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/estruturas/arquivos/promo.pdf>>. Acesso em: 02 abr 2020.

Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. MMA – Ministério do Meio Ambiente. PRONAR. Ações para o fortalecimento do PRONAR. 2009.

Rojas C. S. A. Condições meteorológicas e níveis de poluição na Região Metropolitana de Lima – Perú. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTANA, E. Cunha, K.B.; Ferreira,A.L.; Zamboni,A.; Padrões de qualidade do ar Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia. São Paulo, julho de 2012. Disponível em:

<<https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2012/01/padroes-final01.pdf>>. Acesso em: 20 de mar 2021.

SANTOS, W. L. P. dos; MÓL, Gerson de Souza, SILVA, Roberto Ribeiro da, CASTRO, Eliane Nilvana F. de, SILVA, Gentil de Souza, MATSUNAGA, Roseli Takako, SANTOS, Sandra Maria de Oliveira, DIB, Siland Meiry França. Química e sociedade: um projeto brasileiro para o ensino de química por meio de temas CTS. V. 3, p. 20-28, 2009.

SILVA, C.M.S. Relação entre os Óxidos Nitrogenados NO_x (NO+NO₂) e a Emissão veicular na cidade de Maceió em função de variáveis meteorológicas: Estudo de caso. 2012.

SILVA, M. O. Avaliação da qualidade do ar na cidade de Maceió-AL utilizando o modelo atmosférico WRF/CHEM. Universidade Federal de Alagoas. 2018.

SIMOB/ANTP - Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público. Relatório geral 2017. Publicado em: Janeiro de 2020. Disponível em: <<http://files.antp.org.br/simob/sistema-de-informacao-demobilidade-urbana-da-antp--2017.pdf>>. Acesso em: 01 abr 2020.

SCHIRMER, W.N., LISBOA, H.M. QUÍMICA DA ATMOSFERA: CONSTITUINTES NATURAIS, POLUENTES E SUAS REAÇÕES. 2008. Disponível em: <<https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/viewFile/563/447>> Acesso em: 28 abr 2020.

SCHUCH, D. FREITAS, E.D. Avaliação do modelo WRF-Chem para Dispersão das emissões da frota veicular da região Metropolitana da grande são paulo. 2017.

TOMASONI, A.M; TOMASONI, K. R. ATMOSFERA EM TRANSFORMAÇÃO: o ozônio e os CFCs, certezas e incertezas. Universidade Federal da Bahia. Disponível em: <<http://www.geoambiente.ufba.br/ozonio.pdf>>. Acesso em: 21 fev.2020.

UNAL, Y.S.; TOROS, H.; DENIZ, A.; INCECIK, S. Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area. Atmospheric Environment, v. 45, n. 31, p. 5504-5513. (2011).