

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS NA AMAZÔNIA - INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente

Estudo do impacto da ampliação da usina termoeétrica de Mauá nas concentrações de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM.

Lucas Filipe Barini Rodrigues Grana

Manaus-AM
Novembro, 2019

Lucas Filipe Barini Rodrigues Grana

Estudo do impacto da ampliação da usina termelétrica de Mauá nas concentrações de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM.

Orientador: Dr. Rodrigo Augusto Ferreira Souza

Coorientador: Adan Sady de Medeiros Silva

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente do INPA/UEA como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente, área de concentração Interações Clima-Biosfera da Amazônia.

Manaus, Amazonas

Novembro, 2019



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE Mestrado
DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E
AMBIENTE DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA
AMAZÔNIA E UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS.

Aos 12 dias do mês de dezembro do ano de 2019, às 15:00 horas, na sala de aula C-19, EST/UEA, sito à Av. Darcy Vargas, 1200 – Bairro Parque Dez, reuniu-se a Comissão Julgadora de Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza (Presidente), Profa. Dra. Andrea Viviana Waichman (UFAM) e o Profa. Dra. Rosa Maria Nascimento dos Santos (UEA), tendo como suplente a Dra. Jaidete Monteiro de Souza (UEA) (UEA) e o Dr. Erickson Oliveira dos Santos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública do trabalho de dissertação de Lucas Filipe Barini Rodrigues Grana, intitulado “ESTUDO DO IMPACTO DA AMPLIAÇÃO DA USINA TERMOELÉTRICA DE MAUÁ NAS CONCENTRAÇÕES DE O₃, CO E MATERIAL PARTICULADO SOBRE AS CIDADES DE MANAUS, IRANDUBA E MANACAPURU, UTILIZANDO O WRF-CHEM”, orientado pelo Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza (UEA) e coorientado pelo Prof. Dr. Adan Sady de Medeiros Silva (UEA).

O Presidente da Comissão Julgadora deu início à seção e informou os procedimentos do exame. O aluno fez uma exposição do seu estudo e foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Julgadora de Defesa Pública. A Comissão Julgadora, então, se reuniu e os membros emitiram os seguintes pareceres:

Nome	Parecer	Assinatura
Rodrigo Augusto Ferreira de Souza	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	
Andrea Viviana Waichman	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	
Rosa Maria Nascimento dos Santos	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado () Reprovado	

Nada mais havendo a relatar, foi lavrada a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Julgadora.

©SEDAB/INPA - Ficha Catalográfica Automática gerada com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
Bibliotecário responsável: Jorge Luiz Cativo Alauzo - CRB11/908

G748e Grana, Lucas Filipe Barini Rodrigues
Estudo do impacto da ampliação da
usina
termoelétrica de Mauá nas concentrações de
Ozônio, COe material particulado sobre as cidades
de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o
WRF-CHEM. /
Lucas Filipe Barini Rodrigues Grana;
orientador Rodrigo Augusto Ferreira Souza;
coorientador AdanSady de Medeiros Silva.
-- Manaus:[s.l], 2019.
51 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós
Graduaçãoem Clima e Ambiente) -- Coordenação do
Programa de Pós-Graduação, INPA, 2019.

1. QUÍMICA ATMOSFÉRICA. 2. INTERAÇÃO
BIOSFERA- ATMOSFERA. 3. MODELAGEM CLIMÁTICA.
4. QUALIDADE DO AR. 5. EMISSÃO DE GASES
ANTROPOGÊNICOS. I. Souza, Rodrigo Augusto
Ferreira, orientador II. Silva, Adan Sady de
Medeiros, coorientador III. Título.

CDD: 551.66813

Sinopse: Estudou-se o impacto da instalação da Usina termelétrica de Mauá 3 na pluma de poluição sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru por meio do WRF-CHEM, no período chuvoso de março de 2014. Aspectos como a concentração de ozônio, monóxido de carbono e material particulado foram analisados.

Palavras chave: Modelagem climática; Emissão de gases antropogênicos; Qualidade do ar; Química da atmosfera.

Dedico à minha esposa, meus pais e meu irmão.

Sthefanye L.Grana, Rita de Cássia D.Grana, Marcelo Eduardo Grana e Luke Grana.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

À Deus, que esteve ao meu lado e me deu força, ânimo e crença para não desistir e continuar lutando por este meu sonho e objetivo de vida. A ele eu devo minha gratidão;

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela oportunidade de ter participado do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (PPG CLIAMB);

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos no período de agosto de 2017 a julho de 2019;

Ao Dr. Rodrigo Augusto Ferreira Souza, por ter sido um pai e um orientador, conduzindo-me com segurança e experiência para a conclusão da presente pesquisa;

Ao meu Coorientador Dr. Adan Sady de Medeiros que não poupou esforços para me orientar no uso do modelo e em todos os quesitos quanto a utilização dos dados utilizados;

À minha família que sem eles nada seria possível, a minha mãe e minha esposa, em especial, pela imensa motivação a mim destinada.

RESUMO

Nesse trabalho, buscou-se avaliar o impacto da instalação da Usina termelétrica de Mauá 3 nas concentrações de monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e material particulado (MP_{2.5} e PM₁₀) a partir de uma análise comparativa entre duas simulações numéricas com o modelo WRF-CHEM (Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry). A primeira rodada simulada considerou como cenário de emissão a utilização combinada de óleo combustível, diesel e gás natural usados em 2014, para produção de eletricidade, usados por usinas termelétricas sem a presença da usina de Mauá 3, em que 65% da energia foi gerada por gás natural e os restantes 35% em óleo ou diesel naquele ano (ELETROBRAS, comunicação pessoal, 2014). Posteriormente, uma segunda rodada sob as mesmas condições, mas agora com a adição da usina de Mauá 3, localizada no complexo termelétrico de Mauá, como potência geradora foram adicionadas 328MW, advinda da queima de gás natural. A análise foi simulada utilizando o WRF-CHEM com dados obtidos da primeira campanha intensiva (IOP1), do projeto GoAmazon2014/5, realizada de 1 de fevereiro a 31 de março de 2014, na estação chuvosa. O período escolhido para a análise dos dados foi março de 2014. As análises dos dados foram realizadas na superfície para a região de Manaus. Delimitou-se ainda três sub-regiões de estudo, que representam as áreas vento abaixo de Manaus, nos municípios de Iranduba e Manacapuru, além da capital amazonense. Os dados foram analisados dentro do intervalo da janela fotoquímica, que segundo a resolução do CONAMA nº 491/2018 para os gases CO e O₃ deve-se considerar o intervalo de 8 horas. Neste trabalho foi utilizado o intervalo entre 9:00 h e 16:00 h, hora local, ou entre 13:00h e 20:00 h em UTC (Coordinated Universal Time). Já para as análises do material particulado (PM_{2.5} e PM₁₀) foi utilizado todo o intervalo de 24 horas. As análises foram realizadas por meio de campos médios mensal, diferença dos campos médios mensais entre as rodadas e diagrama de caixa das concentrações dos gases estudados, para cada região de estudo. Os resultados mostram que o incremento da nova planta termelétrica de geração de energia causou aumentos em menores proporções nas concentrações de poluentes, em comparação às concentrações já encontradas no cenário anterior. Observou-se ainda que o impacto foi local, situado na região do entorno da usina termelétrica. Analisando individualmente a cidade de Manaus, o ozônio sofreu uma redução de 1,71% na concentração da 2ª rodada com a usina de Mauá 3, em relação a rodada sem a usina e na região da localização da

usina houve diminuição máxima de 39,6% da concentração de ozônio formado. Para o gás CO foi encontrado um aumento sobre a região do município de Manaus de 0,90% na concentração. Na localização da usina de Mauá 3 houve aumento máximo de 75% da concentração de monóxido de carbono. Para o material particulado fino obteve-se consecutivamente aumento médio de 12,5%, enquanto para o material particulado grosso o aumento médio foi de 11,36% entre as duas rodadas. Assim, a partir desse estudo será possível entender melhor as relações entre as emissões de gases gerados por usinas termelétricas e a pluma de poluição no período chuvoso sobre a Amazônia. Além do interesse científico, faz-se ampliar os estudos sobre o ozônio troposférico, óxidos de nitrogênio e materiais particulados para a adoção de políticas públicas que visem manter os níveis de qualidade do ar dentro dos padrões permitidos pelos órgãos de controle e eventualmente adotar iniciativas para melhorar a qualidade do ar da cidade de Manaus.

ABSTRACT

This master's work aimed to evaluate the impact of the installation of the Mauá 3 thermal power plant on CO, O₃, MP_{2.5} and MP₁₀ concentrations, performing the comparative analysis between two simulated rounds. The first simulated round considered as an emission scenario the mix of fuel oil, diesel and natural gas used in 2014 for electricity production, used by thermoelectric plants without the presence of the Mauá 3 plant, where 65% of the energy was generated. natural gas and the remaining 35% in oil or diesel that year (ELETROBRAS, personal communication, 2014). Subsequently a second round under the same conditions, but with the addition of the Mauá 3 plant, located in the Mauá thermoelectric complex, as generating power, 328 MW were added, resulting from the burning of natural gas. The analysis was simulated using the WRF-CHEM with data obtained from the GoAmazon2014/5 intensive IOP1 campaign, held from February 1 to March 31, 2014 in the rainy season. The period chosen for data analysis was March 2014. Data analyzes were performed on the surface for the Manaus region. It also delimited three subregions of study, which represent the wind areas below Manaus, in the municipalities of Iranduba and Manacapuru, besides the Amazonian capital. Data were analyzed within the range of the photochemical window, which according to CONAMA Resolution No. 491/2018 for CO and O₃ gases should consider the 8-hour interval, beginning at 9:00 hrs. at 16:00 hrs. local, or 1:00 pm at 20:00 hrs. in UTC. For the analysis of particulate matter MP_{2.5} and MP₁₀, the entire 24-hour interval was used. The analyzes were made by means of monthly average fields, difference of monthly average fields between the rounds and cash diagram of CO and O₃ gases for each study region. The results show that the significant increase in the new thermoelectric power plant caused smaller increases in pollutant concentrations, compared to the concentrations already found in the previous scenario. It was observed that the impact was local, located in the thermoelectric plant region. Analyzing the city of Manaus individually, ozone decreased by 1.71% in the concentration of the second round with the Mauá 3 plant in relation to the round without the plant and in the region of the plant location there was a maximum decrease of 39.6%. of the concentration of ozone formed. For CO gas was found an increase over the area of Manaus municipality of 0.90% in concentration. At the location of the Mauá 3 plant there was a maximum increase of 75% in the carbon monoxide concentration. For fine particulate matter, the average increase was 12.5% consecutively, while for coarse particulate matter, the average increase was 11.36% between the two

rounds. Thus, from this study it will be possible to better understand the relationships between gas emissions generated by thermal power plants and the pollution plume in the rainy season over the Amazon. In addition to the scientific interest, studies on tropospheric ozone, nitrogen oxides and particulate materials are expanded to adopt public policies aimed at maintaining the rate allowed by the main environmental agencies, and thus improving air quality.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
CAPÍTULO 1 - Estudo do impacto da instalação da usina de Mauá na concentração de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM.....	11
LISTA DE TABELAS	13
CAPÍTULO 1 - Estudo do impacto da instalação da usina de Mauá na concentração de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM.....	13
1. INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	17
CAPÍTULO 1 - Estudo do impacto da instalação da usina de Mauá na concentração de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM.....	18
ABSTRACT.....	19
RESUMO.....	19
INTRODUÇÃO.....	20
MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....	43
SÍNTESE.	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - Estudo do impacto da instalação da usina de Mauá na concentração de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM

Figura 1. Imagem de satélite da localização do complexo termelétrico de Mauá.	22
Figura 2. Imagem de satélite da cobertura do solo da região de estudo. Manaus - localizado em 3,1 "S, 60,0" W - é visível no centro. Usinas elétricas (marcadores vermelhos) e uma refinaria de petróleo (marcador azul) são indicados.....	23
Figura 3. Áreas selecionadas para o estudo. Da esquerda para direita as áreas representam os municípios de Manaus, Iranduba e Manacapuru.....	29
Figura 4. Campo médio mensal de CO para o mês de março de 2014, sendo a 2º rodada simulada, com adição da usina termelétrica de Mauá 3.....	30
Figura 5. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de CO.....	31
Figura 6. Boxplots da média na área de Manaus para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários do CO. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Manaus para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.....	33
Figura 7. Boxplots da média na área de Iranduba para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários do CO. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Iranduba para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.....	34
Figura 8. boxplot da média na área de Manacapuru para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários do CO. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Manacapuru para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.....	35

Figura 9. Campo médio mensal de O ₃ para o mês de março de 2014, sendo a 2º rodada simulada, com adição da usina termelétrica de Mauá 3.....	36
Figura 10. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de O ₃	37
Figura 11. Boxplots da média na área de Manaus para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários de O ₃ . Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Manaus para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.....	38
Figura 12. Boxplots da média na área de Iranduba para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários de O ₃ . Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Iranduba para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.....	39
Figura 13. Boxplots da média na área de Manacapuru para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários de O ₃ . Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Manacapuru para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.....	40
Figura 14. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de PM 2,5.....	41
Figura 15. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de PM 10.....	41

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - Estudo do impacto da instalação da usina de Mauá na concentração de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM

TABELA 1. Nomes das usinas termelétricas de Manaus, combustível usado, energia gerada (em março de 2014) e localização.....	24
--	----

INTRODUÇÃO GERAL

O processo de urbanização da região norte do Brasil vem aumentando ao longo dos anos, resultando em um processo de mudança, principalmente no uso da terra, afetando potencialmente grandes áreas de floresta (Davidson, 2012; Fraser, 2014). Decorrente deste aumento populacional e expansão das áreas urbanas, começam-se a surgir os efeitos das emissões antropogênicas para o clima e na qualidade do ar. Embora todas essas cidades, como por exemplo Manaus, sejam cercadas por uma área de floresta densa, praticamente inexplorada, de atmosfera limpa, as interações entre os gases provenientes de ações antrópicas com as emissões biogênicas, ainda são pouco compreendidas (Lindsay et.al, 2018).

Um dos fatores que vem contribuindo para essa emissão antropogênica é o aumento da demanda de geração de energia, decorrente, novamente do aumento populacional. Atualmente, Manaus possui mais de 2 milhões de habitantes de acordo com dados do IBGE (2018), os quais se beneficiam diariamente da energia produzida pelas principais termelétricas geradoras do Estado. Essa energia provém, em sua grande maioria, da queima de combustíveis fósseis (óleo diesel, óleo combustível e gás natural). Com isso, entende-se que aproximadamente 75% da energia elétrica utilizada na cidade de Manaus é obtida a partir da queima de combustíveis fósseis e gás natural, pelo fato de haver na região Amazônica um baixo potencial hídrico e eólico. Isso se dá pois na Amazônia há predominantemente rios de planície, que ao serem submetidos a hidrelétricas, por exemplo, ocasionam imensos desastres naturais, como, alagamentos de vastas áreas florestais, áreas agrícolas e indígenas. Com o aumento da utilização de recursos energéticos e de perda de floresta adjacente, eleva-se a concentração de poluentes emitidos para a atmosfera e assim contribuindo para a degradação da qualidade do ar da região. A emissão de poluentes na atmosfera, os quais em contato com compostos orgânicos voláteis biogênicos (BCOV'S) emitidos pela floresta, em grandes quantidades, e com a radiação incidente sofrem reações químicas que contribuem para a perturbação da atmosfera limpa da floresta (Cropper e Griffiths, 1994).

Alguns dos gases emitidos diretamente pela queima de combustíveis fósseis, sendo esses óleo diesel, óleo combustível e gás natural é o NO_x e o CO , os quais em contato com compostos orgânicos voláteis biogênicos e com a radiação incidente, provocam reações químicas que contribuem para o aumento do ozônio troposférico (O_3), que é prejudicial à saúde e é um dos parâmetros de referência para se avaliar a qualidade

do ar de uma região. As emissões desses gases antropogênicos podem se dar por fontes móveis, (provenientes de automóveis, caminhões, motocicletas, entre outros) ou de fontes estáticas, como usinas e refinarias. O aumento de gases emitidos diretamente por essas fontes, impactam diretamente na produção de aerossóis secundários na região (De Sá et al., 2017; Palm et al., 2018). Esses aerossóis secundários terão impacto importante na química dos compostos orgânicos voláteis (COV) biogênicos e do radical hidroxila (OH) (Liu et al., 2016), que contribuem para processos de oxidação e formação de gases, modificando assim a composição química da atmosfera Amazônica.

Atualmente há meios de regulação da emissão desses compostos na atmosfera, e um dos principais reguladores é o CONAMA (Conselho Nacional Do Meio Ambiente), que por meio de resoluções explicita as concentrações máximas permitidas de cada poluente na atmosfera. Tais valores contribuem para que a qualidade do ar não seja afetada pelo aumento excessivo dos gases que contribuem para a formação da pluma de poluição que não somente estará sobre a cidade afetando a saúde da população local, como também, afetando a população de outras regiões próximas às áreas de emissão.

Neste sentido, Manaus tem sido fonte de estudos envolvendo a qualidade do ar, como por exemplo, os trabalhos realizados por Kuhn et al., 2010; Medeiros et. al, 2017; Martin et al., 2016; Machado et al., Sá et. al,2017, entre outros trabalhos. Estudos como os realizados no âmbito do projeto GoAmazon2014/5 abrem oportunidades para a análise da poluição emitida pela cidade de Manaus que é cercada por uma floresta e tão pouco explorada no contexto de estudos sobre poluição atmosférica urbana.

Os dados selecionados para esse estudo são oriundos da primeira campanha intensiva (IOP1) realizada entre os dias 1 de fevereiro a 31 de março de 2014, período chuvoso na região amazônica. Por consequência do uso dos dados, foi selecionado o mês de março, o qual na análise sinótica para este mês indicou que a região de Manaus estava tipicamente sob a influência do ar proveniente do Oceano Atlântico Norte (Martin et al., 2016), organizados em sistemas convectivos de mesoescala, acionados pela brisa do mar e a circulação trouxe precipitação generalizada, com taxa moderada para a região (Giangrande et al., 2017; Machado et al., 2018; Burleyson et al., 2016). Os altos níveis de precipitação e umidade na estação chuvosa, inibiu a queima de biomassa e um baixo número de queimadas foi registrado neste período para a região (Martin et al., 2016; Machado et al., 2018). Sob essas condições, a região em que as cidades desse estudo se inserem é uma das regiões continentais mais limpas da Terra, sobre a qual a pluma de

Manaus representa uma perturbação significativa na qualidade do ar local (Martin et al., 2010b; Artaxo et al., 2013; Shilling ,et al.2018) .Tais condições permitem que a queima por biomassa possa ser negligenciada, permitindo uma análise mais direcionada ao objetivo do trabalho.

Assim, determinar qual é a real contribuição do sistema antropogênico de poluentes atmosféricos para o meio ambiente e para os seres humanos não é uma tarefa simples. Sua dificuldade reside em estudar separadamente as emissões de substâncias naturais e de fontes humanas e suas complexas relações na atmosfera. Há fenômenos que dificultam a compreensão do papel de cada componente de emissão na região estudada. Nesse contexto, os modelos atmosféricos com tratamento de processos físicos e químicos tornam-se uma ferramenta indispensável para os estudos do impacto da poluição urbana (Cirino et. al,2018). É nesse contexto em que esse trabalho procura analisar o impacto da usina termelétrica de Mauá 3, a qual aumentou a capacidade do complexo termelétrico de Mauá, com seus 328 *MW* de potência. Essas análises contribuem para a discussão acerca dos efeitos do incremento de aproximadamente 30% da energia gerada para a qualidade do ar da região. Ainda, é possível avaliar o efeito desse incremento das emissões de compostos poluentes nas regiões vento abaixo de Manaus. Dessa forma, busca-se contribuir para a regulação de políticas públicas e na melhora da qualidade do ar, como também se contribui no melhor entendimento a respeito da influência de uma fonte estacionária para a poluição urbana.

1.1 GERAL

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar o impacto na qualidade do ar da instalação da usina de Mauá 3, implantada no complexo termelétrico de Mauá, utilizando o modelo WRF-CHEM. Para tanto, foram planejados os seguintes objetivos específicos:

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 1- Analisar a pluma de poluição sobre as regiões de Manaus, Iranduba e Manacapuru com o aumento da matriz energética gerada pela termelétrica de Mauá 3, a partir de simulações com o modelo WRF-CHEM;

- 2- Avaliar o impacto nas concentrações de ozônio, monóxido de carbono e material particulado fino (PM_{2.5}) e grosso (PM₁₀) na qualidade do ar, nas regiões de Manaus, Iranduba e Manacapuru.

CAPÍTULO 1

Lucas Filipe Barini Rodrigues GRANA; Adan Sady de Medeiros Silva; Rodrigo Augusto Ferreira Souza, 2019. Estudo do impacto do aumento da usina de Mauá nas concentrações de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM. Manuscrito formatado para Acta Amazônica.

STUDY OF THE IMPACT OF THE MAUÁ PLANT INSTALLATION ON THE CONCENTRATION OF OZONE, CO AND PARTICULAR MATERIAL ON THE CITIES OF MANAUS, IRANDUBA AND MANACAPURU, USING WRF-CHEM

ABSTRACT: This study aimed to evaluate the pollution plume over the regions of Manaus, Iranduba and Manacapuru with the increase of the energy matrix generated by the Mauá 3 thermoelectric plant using the WRF-CHEM model. Also, analyze the concentrations of ozone, carbon monoxide and fine and coarse particulate matter for air quality in the regions of Manaus, Iranduba and Manacapuru. The data used were obtained from the GOAMAZON 2014/5 project of the first intensive IOP1 campaign carried out from February 1 to March 31, 2014, for the rainy season over the Amazon region. The analysis performed compared two simulated similar rounds with and without the presence of the Mauá 3 thermoelectric plant. The power of 328 MW was the only parameter changed in the model. It was concluded that there was no impact of the gases emitted by the burning of the plant, in the pollution plume transported to the analyzed cities. The impact was observed to be local, close to the emission source. The CO and particulate matter values increased in the round with the mill compared to the round without the mill. But ozone values have decreased for the same rounds analysis. However, this work contributes to a better understanding of the relationship between gas emissions by thermoelectric plants and their influence on air quality. It also contributes to climate modeling research groups to improve the representation of physical and chemical processes that occur in the atmosphere of the Amazon region under the influence of anthropogenic emitters.

Keywords: Climate modeling; Anthropogenic gas emission; Air quality; Atmosphere chemistry.

ESTUDO DO IMPACTO DA INSTALAÇÃO DA USINA DE MAUÁ NA CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, CO E MATERIAL PARTICULADO SOBRE AS CIDADES DE MANAUS, IRANDUBA E MANACAPURU, UTILIZANDO O WRF-CHEM

RESUMO: Neste estudo buscou-se avaliar a pluma de poluição sobre as regiões de Manaus, Iranduba e Manacapuru com o aumento da matriz energética gerada pela termelétrica de Mauá 3 utilizando o modelo WRF-CHEM. Como também, analisar, as concentrações de ozônio, monóxido de carbono e material particulado fino e grosso para a qualidade do ar nas regiões de Manaus, Iranduba e Manacapuru. Os dados utilizados foram obtidos do projeto GOAMAZON 2014/5 da primeira campanha intensiva IOP1 realizada entre os dias 1 de fevereiro a 31 de março de 2014, para o período de chuvoso sobre a região amazônica. A análise realizada comparou duas rodadas semelhantes simuladas com e sem a presença da usina termelétrica de Mauá 3. Sendo a potência de 328 MW o único parâmetro alterado no modelo. Concluiu-se que não houve impacto dos gases emitidos pela queima da usina, na pluma de poluição transportada para as cidades analisadas. Observou-se que o impacto foi local, próximo a fonte de emissão. Os valores de CO e material particulado aumentaram na rodada com a usina em relação a rodada sem a usina. Mas os valores de ozônio reduziram, para a mesma análise das rodadas. Contudo, esse trabalho contribui para o melhor entendimento das relações entre emissões de gases por usina termelétricas e sua influência na qualidade do ar. Também, contribui para que grupos de pesquisa sobre modelagem climática possam melhorar a representação dos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera da região amazônica sob influência de fonte emissoras antropogênicas.

Palavras-Chaves: Modelagem climática; Emissão de gases antropogênicos; Qualidade do ar; Química da atmosfera.

INTRODUÇÃO

Manaus, uma cidade com mais de dois milhões de habitantes segundo dados do IBGE (2018), na Amazônia central, libera continuamente no ambiente, uma pluma de poluição urbana em uma região normalmente de atmosfera limpa (Kuhn et al., 2010; Martin et al., 2017). Toda a região de Manaus e vento abaixo, especialmente na estação chuvosa, quando quase não há registros de incêndios (Artaxo et al., 2013), oferece um laboratório natural para a investigação da interação de gases biogênicos com gases antropogênicos provenientes de Manaus (Shilling et al., 2018).

A formação desta pluma de poluição se dá, principalmente, pela emissão de poluentes advindos da queima de combustíveis fósseis por usinas termelétricas e emissões de escapamentos de veículos automotivos. Após a emissão desses gases na atmosfera, as concentrações dessas substâncias variam no espaço e no tempo em funções de reações químicas, de fenômenos de transporte, de parâmetros meteorológicos, como os ventos, turbulências e inversões térmicas, assim como da topografia da região. Para isso, as condições meteorológicas da região possuem um papel determinante na descrição físico-química do transporte de poluentes entre a fonte e o receptor. A análise dos dados meteorológicos, a definição dos períodos críticos, o monitoramento dos poluentes e a modelagem numérica para a simulação da qualidade do ar são ferramentas essenciais no planejamento de novas atividades industriais na região, bem como para elaboração de planos de controle da poluição do ar na região.

Há estudos numéricos, os quais possuem foco especial em diferentes aspectos do impacto da poluição, como episódios de poluição regional e de longa distância (Jiang et al., 2012; Michael et al., 2013; Kuik et al., 2015), transporte (Tie et al., 2007; Guo et al., 2009; Lin et al., 2010), formação secundária de gases e partículas (Yerramile et al., 2010; Jiang et al., 2012; Lowe et al., 2015) e os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra (Capucim et al., 2015; Rafee et al., 2015). Estudos como o de Reddy e Venkataramn (2002), realizado na Índia, concluíram que a principal emissão de um material particulado e o dióxido de enxofre é proveniente de usinas de combustíveis fósseis. As emissões de dióxido de enxofre (SO₂) pelas usinas são responsáveis por mais de 60% das emissões do país. Em outro exemplo, em estudo realizado na China, Zhang e colaboradores (2012) concluem que a maioria das fontes de $MP_{2,5}$ (materiais particulados finos) são do setor energético, principalmente usinas de energia, excedendo a contribuição

de fontes industriais, residenciais e de transporte. Também da China, resultados de Huang e colaboradores (2011) estimam que as fontes estacionárias contribuem em aproximadamente 97, 86, 89, 91 e 69% das emissões totais dos gases SO_2 , NO_x , MP_{10} (material particulado grosso), $MP_{2,5}$ e VOC (composto orgânico volátil), respectivamente.

É possível ver que há inúmeros estudos dos efeitos da ação antropogênica na qualidade do ar em diferentes regiões. No entanto, esses estudos não investigam o impacto de plumas urbanas em regiões isoladas e sob alta influência de vegetação densa. Dessa forma, a cidade de Manaus é um dos cenários únicos no mundo, em que uma área urbana isolada fica no centro de uma vasta floresta tropical (Martin et al., 2016). Então, a região é um laboratório valioso, por exemplo, para o estudo do impacto das emissões antropogênicas de poluentes atmosféricos na composição química da atmosfera local. Embora haja um número de estudos envolvendo medições de poluentes atmosféricos na região amazônica (por exemplo, Kuhn et al., 2010; Trebs et al., 2012; Baars et al., 2012; Artaxo et al., 2013), a maioria dos trabalhos foram publicados recentemente com os resultados do projeto GoAmazon2014/5 (Martin et al., 2016, 2017; Alves et al., 2016; Pöhlker et al., 2016; Sá et al., 2017; Kourtchev et al., 2016; Hu et al., 2016; Bateman et al., 2017; Cecchini et al., 2016; Jardine et al., 2016). Em termos de número de estudos, apenas alguns deram enfoque ao papel das fontes de emissão antropogênica na região de Manaus. Dessa forma, torna-se imprescindível o estudo sistemático dos efeitos antropogênicos na região, uma vez que essa influência altera sobremaneira a composição atmosférica da região, que responde ao incremento de poluentes emitidos na atmosfera, não apenas em partículas, mas também em gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros compostos secundários, como ozônio (O_3), o qual é formado a partir da reação entre as concentrações de compostos orgânicos voláteis e de óxidos nitrogenados, que em contato com a radiação solar incidente, forma o ozônio.

Algumas análises feitas por estudos anteriores concluíram que as consequências das emissões vão além de sua fonte inicial e podem chegar ainda mais longe, durante longos períodos. Em geral, os estudos mais recentes enfocam, principalmente, nas emissões antropogênicas das megacidades no mundo em desenvolvimento (Zhu et al., 2013). Isso aconteceu porque essas cidades aumentaram sua demanda por energia, que tem sido elevada nas últimas décadas (Lutz et al., 2001). E isso não tem sido diferente na

cidade de Manaus, que devido à necessidade de alta demanda energética, cria-se um ambiente favorável para a instalação de Termelétricas, como a Usina de Mauá 3, presente neste estudo, com potência de 328 MW, proveniente da queima de gás natural. Dessa forma, o incremento da termoelétrica de Mauá com cerca de 30% do total da energia gerada atualmente em Manaus constitui-se como importante experimento, para o estudo dos efeitos do uso de gás natural na qualidade do ar no contexto de florestas tropicais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo é apresentada a metodologia utilizada nesse trabalho, como a localização da usina termelétrica de Mauá 3, o modelo que foi utilizado, os domínios utilizados, as áreas selecionadas para estudo de caso, as parametrizações físicas e químicas utilizadas, as condições de contorno, os cálculos de emissões antropogênicas e biogênicas inseridas no modelo, além da descrição das rodadas que foram realizadas. A Figura 1 mostra a localização da termoelétrica de Mauá, situada na localização de latitude $3^{\circ} 7'1.69''S$ e longitude de $59^{\circ}55'47.65''O$, dentro do complexo termelétrico de Mauá, na zona leste de Manaus.

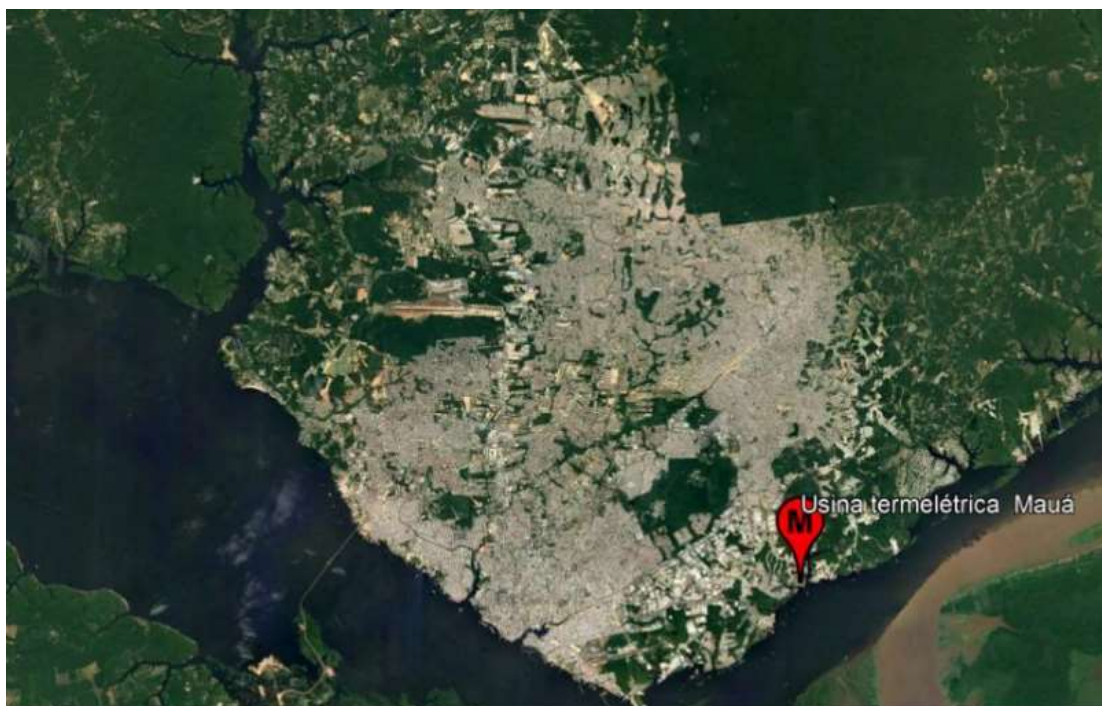


Figura 1. Imagem de satélite da localização do complexo termelétrico de Mauá. Fonte: Google Earth PRO

Foi selecionada a usina termelétrica de Mauá 3, na qual houve o incremento de potência emitida em 328 MW, na produção de energia elétrica para a cidade de Manaus, ou seja, em torno de 30% da potência total utilizada por Manaus, antes da nova termoelétrica. Neste estudo foi utilizado o modelo WRF, versão 3.6.1 (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>) acoplado com modulo químico (WRF-CHEM, Grell *et al.*, 2005). As simulações com o modulo WRF-CHEM foram definidas para dois domínios, os quais estão ilustrados na Figura 2. A configuração de grades segue a metodologia proposta por Medeiros e colaboradores 2017, em que o domínio 01, com 105 x 80 de pontos de grade e uma resolução horizontal de 10 km abrange a região metropolitana de Manaus, enquanto o domínio 02, com 151 x 116 de pontos de grade com uma resolução horizontal de 2 km, abrange além da capital amazonense, mais dois municípios vento abaixo de Manaus (Iranduba e Manacapuru).

O centro da grade é a mesma para ambos os domínios (-2.908° de latitude e longitude -60.31°), estruturados em 36 níveis verticais. As simulações foram realizadas para a estação chuvosa, já que se está interessado em observar apenas a contribuição de emissões antropogênicas e biogênicas da floresta, descartando-se os efeitos da queima de biomassa, amplamente presente durante o período seco da região.

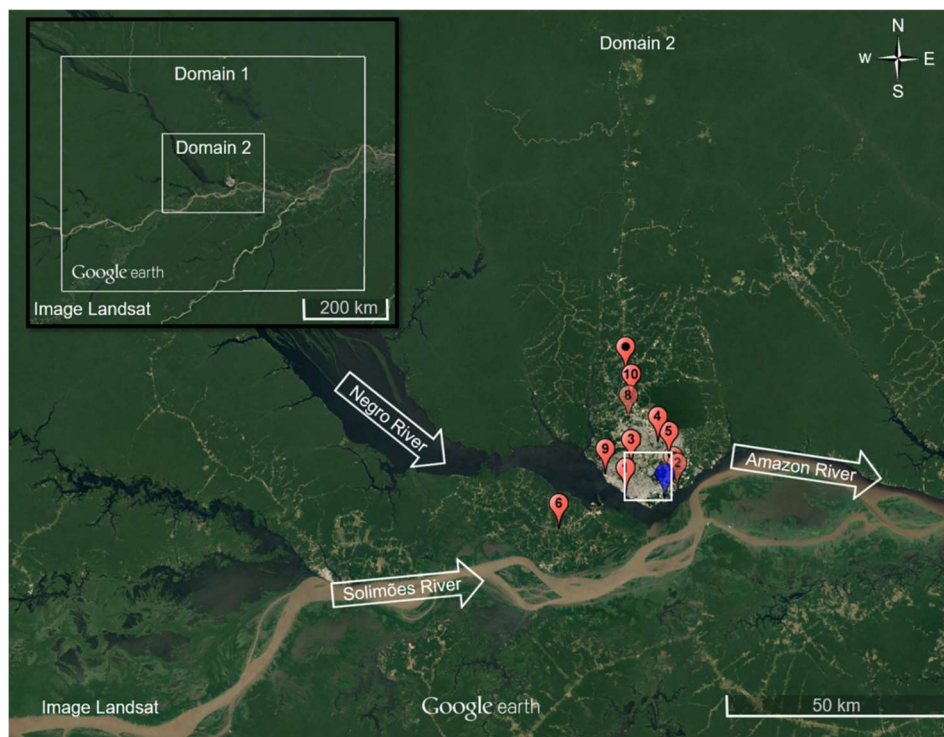


Figura 2. Imagem de satélite da cobertura do solo da região de estudo. Manaus - localizado em $3,1^\circ$ S, $60,0^\circ$ W - é visível no centro. Usinas elétricas (marcadores vermelhos) e uma refinaria de petróleo (marcador azul) são indicados. Fonte: Medeiros et al., Power plant fuel switching and air quality in a tropical, forested environment, 2017).

No canto superior esquerdo da Figura 2, as duas grades usadas na modelagem são mostradas. O exterior da grade tem cantos de 5,10 "S, 63,14" W e 0,73 "S, 57,48" W. A grade interna tem cantos de 3,63 "S, 61,26" W e 2,16 "S, 59,36" W. A Tabela 1 apresenta os nomes das termelétricas, os combustíveis utilizados, a potência total gerada em cada usina e a localização das mesmas, de acordo com Medeiros e colaboradores (2017). Esses dados foram utilizados para efetuar o inventário de emissões antropogênicas de fontes fixas descritos posteriormente.

Usina elétrica	Combustível	Energia gerada(MW)	Localização
Aparecida	D (5%) G (95%)	135,2	-3.130 N, -60.032 E
Mauá/electron	F (7.8%) G (35.6%) D (56.6%)	255,3	-3.121N , -59.930 E
Flores	D	41,4	-3.074 N, -60.022 E
Cidade Nova	D	8,6	-3.029 N, -59.969 E
São José	D	18,0	-3.059 N, -59.947 E
Irاندوبا	D	21,9	-3.200 N, -60.165 E
Breithener Tambaqui	G	61,9	-3.108 N, -59.938 E
Breithener Jaraqui	G	61,5	-2.987 N, -60.027 E
Ponta Negra	G	65,1	-3.092 N, -60.073 E
Manauara	F (10.9%) G (89.1%)	64,3	-2.945 N, -60.021 E
Cristiano Rocha	F (10.5%) G (89.5%)	68,0	-2.891 N, -60.033 E

Tabela 1. Nomes das usinas termelétricas de Manaus, combustível usado, energia gerada (em março de 2014) e localização. Os detalhes da geração de energia e tipo de combustível utilizado em cada usina foram obtidos da ELETROBRAS (2014). Fonte: Medeiros et al. (2017).

PARÂMETROS METEOROLÓGICOS E QUÍMICOS

A configuração padrão dos parâmetros meteorológicos e químicos do modelo utilizado foi baseada no estudo realizado por Medeiros e colaboradores 2017, logo as simulações apresentaram esquemas: Lin (Purdue) (Lin *et al.*, 17 1983) para microfísica de nuvens; MM5 para camada superficial (Beljaars, 1995), Noah para superfície terrestre (Chen e Dudhia, 2001) , YSU para a Camada Limite Planetária (Hong *et al.*, 2006), Goddard para a radiação de onda curta (Chou e Suarez, 1994); Rapid transfer Model (Mlawer *et al.*, 1997) para a radiação de ondas longas; Kain-Fritsch para cúmulos (Kain, 2004). Para mecanismos químicos foi utilizada a parametrização RADM2 (Stockwell *et al.*, 1990).

Os dados meteorológicos para as condições iniciais e contorno foram obtidos do National Center for Environmental Prediction (NCEP), com resolução horizontal $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ e resolução temporal a cada seis horas, a partir do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Saha *et al.*, 2014). O modelo de uso e ocupação do solo utilizado foi gerado pelos dados do sensor MODIS (Rafee *et al.*, 2015), que representa bem os tipos de uso da terra para a região de interesse. Finalmente, as primeiras 24h de cada rodada foram descartadas, para fins de estabilização das rodadas do modelo WRF-CHEM.

CONDIÇÕES DE CONTORNO

O modelo usado nesse estudo para gerar as condições iniciais e de contorno dos compostos químicos é o MOZART-4 (Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4) (Emmons *et al.*, 2010). Com esse modelo, é possível gerar campos para gases traço dos mais diversos mecanismos químicos, bem como valores de aerossóis. Para isso, é necessário obter os dados referentes aos dias desejados em <http://www.acom.ucar.edu/wrf-chem/mozart.shtml>.

EMISSÕES BIOGÊNICAS

Para as emissões biogênicas, foram utilizadas as saídas provenientes do modelo MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), que apresenta um conjunto de dados de emissões biogênicas global, com uma resolução espacial horizontal

de 1 km (Guenther et al., 2012). O modelo MEGAN fornece os seguintes dados de entrada para as rodadas do modelo WRF-CHEM: quantidade de isopreno, percentual de folhas largas, percentual de folhas finas (needle), percentual de arbustos, percentual de herbáceos, índice de área foliar mensal, temperatura do ar mensal e radiação de onda curta mensal.

EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS

As emissões antropogênicas de compostos químicos constituem outro ponto fundamental na modelagem de química da atmosfera. Para a região de interesse, existem três componentes principais de emissões atmosféricas a serem consideradas: a emissão dos poluentes por tipo de TPP (emissão da planta de usinas termelétricas), em cada ponto de grade, emissão total de cada poluente da refinaria e emissões de fontes móveis. Foram utilizados os bancos de dados levantados dos três tipos de emissão antropogênica, gases emitidos e potências geradas por cada fonte emissora por Medeiros e colaboradores 2017.

A emissão de usinas termelétricas (TPPs) de diferentes tipos de queima de combustível foram consideradas para o inventário de fontes estacionárias na região estudada e na refinaria localizado dentro da área urbana de Manaus. As contribuições sobre as emissões antrópicas ocorrem indiretamente pelo alto consumo de energia fornecida pela os TPPs. A emissão dos poluentes por tipo de TPP em cada ponto de grade de estudo foi calculado de acordo com as estimativas de fatores de emissão, consumo de combustível e energia de geração, usando Eq. (1):

$$E_p(i, j) = \sum_{k=1}^N = EF_p \times FC \times PG(i, j, k) \quad (1)$$

onde $E_p(i, j)$ representa a emissão de poluentes, P cada ponto de grade (i, j) , em gramas por hora (gh^{-1}); EF_p é a emissão fator de poluente P , em gramas por litro (gL^{-1}); FC é o consumo de combustível, em litros por quilowatts hora ($LkWh^{-1}$) e $PG(i, j, k)$ é a geração de energia do TPP (k) , para cada ponto de grade (i, j) em quilowatt(KW).

A emissão total de cada poluente da refinaria é dada pela equação (2):

$$E_p(i, j) = EP_p \times V \quad (2)$$

onde, $E_p(i, j)$ representa a emissão de poluentes P , em gramas por hora (gh^{-1}); EP_p é o fator de emissão de poluente P em gramas por litro (gL^{-1}); V é o volume de petróleo refinado em litros por hora (Lh^{-1}).

A emissão por fontes móveis utiliza dados de luminosidade noturna obtidos de satélite para estimar inventários de emissões de fontes móveis, as quais obedecem a equação (3):

$$E(i, j, k) = \Sigma EF_{k,n} \times An \times C1 \times 10C2 \times Nn(i, j) + fn(i, j) \quad (3)$$

Em que $EF_{k,n}$ representa o fator de emissão da espécie k para o veículo do tipo n , An é a atividade veicular, $Nn(i, j)$ é o índice de luminosidade noturna nos pontos de coordenadas (i, j) , $fn(i, j)$ é uma função de correção de fundo (para áreas não urbanas) e $C1$ e $C2$ são constantes ajustáveis em função dos aspectos regionais que levam em consideração o número de veículos por índice de luminosidade noturna (Martins et al., 2010).

RODADAS REALIZADAS E ANÁLISES UTILIZADAS

Para realizar o estudo comparativo entre o cenário padrão e o cenário contendo o incremento da termelétrica de Mauá, foram simulados dois grupos para o mês de março de 2014 (IOP1 do GoAmazon). Esse período foi escolhido especialmente por já haver validação do inventário de emissões implementado em Medeiros et. al, 2017. Foi feita uma rodada padrão, considerando a queima de óleo combustível, óleo diesel e gás natural por parte das termelétricas, da refinaria de Manaus e emissão dos veículos antes da implementação da usina termelétrica de Mauá 3 (utilizando o levantamento de emissões realizado por Medeiros e colaboradores 2017), no complexo termelétrico de Mauá. O segundo cenário foi simulado considerando o padrão utilizado na primeira rodada acrescido dos 328 MW, obtidos por meio de queima de gás natural, da nova planta de

geração de energia em Mauá 3, em 2018. Uma vez realizadas as rodadas considerando a meteorologia para março de 2014, foram feitas as seguintes análises:

- i) Análise comparativa das duas rodadas, buscando avaliar o impacto desse incremento da geração de energia elétrica da nova planta de Mauá 3. Essas análises comparativas das duas rodadas foram feitas por meio de campos médios mensais para os gases de CO e O_3 , como também a diferença da concentração dos campos médios mensais entre as rodadas, para os mesmos gases, no período de março de 2014, para o intervalo da fotoquímica delimitada pela resolução do CONAMA nº 491/2018, que identifica a análise para o intervalo de 8 horas, para o período entre 9:00 h e 16:00 h (hora local);
- ii) Análise de diagramas de caixa nas regiões de interesse desse estudo, realizando a média da concentração mensal na área de estudo e a diferença entre as rodadas para mesmo período mensal, dentro do intervalo da fotoquímica, já mencionado, para os gases de CO e O_3 para cada área de estudo.
- iii) Análise dos campos da diferença de concentração média de material particulado, $MP_{2,5}$ e MP_{10} , para o mês de março de 2014, a fim de identificar o aumento percentual modelado, dentro do intervalo de 24 horas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das simulações realizadas dos dois cenários descritos na metodologia, foram analisadas as principais diferenças obtidas entre elas. A primeira análise consiste nos campos espaciais mensais e da diferença entre os cenários para o composto químico monóxido de carbono (CO), para o mês de março de 2014. Foram consideradas as horas de fotoquímica estabelecidas por metodologia proposta pela CONAMA (2018), em que são consideradas oito horas diárias (Figuras 3 e 4, respectivamente).

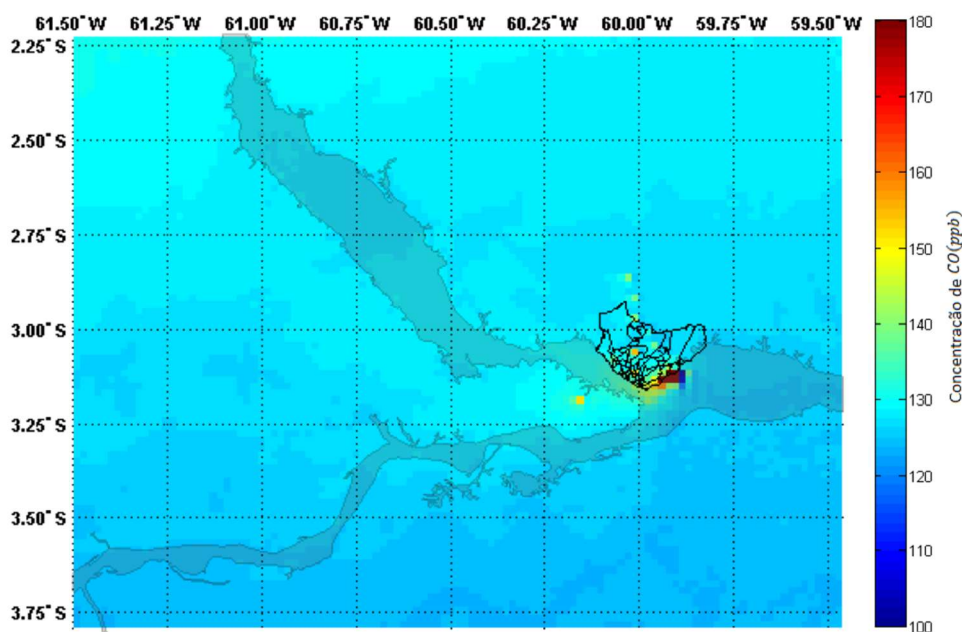


Figura 3. Campo médio mensal de CO para o mês de março de 2014, 2ª rodada simulada, com adição da usina termelétrica de Mauá 3.

No campo médio mensal (Figura 3), é possível observar que as maiores concentrações estão localizadas no entorno da cidade de Manaus. Isso mostra que a pluma de CO levada pelos ventos predominantes para os municípios adjacentes e já encontrada em Medeiros et al. (2017b) possui alta variabilidade, tornando-se de difícil detecção na análise de campos médios mensais. Dessa forma, os pontos de maiores concentrações ficam contidos na região das usinas termoelétricas, uma vez que a queima de combustíveis fósseis, por esse meio, emite grandes quantidades de poluentes. É possível ainda ver que as concentrações padrão (background) de CO são coerentes com os valores encontrados por Martin e colaboradores (2016) e Medeiros e colaboradores (2017b), além dos dados obtidos durante as medições do projeto GoAmazon2014/5.

A Figura 4 apresenta a diferença dos campos médios mensais de CO para as duas rodadas, tomando como referência a 2ª rodada (com o incremento de Mauá 3) menos a 1ª rodada. Observou-se que houve um incremento na concentração de CO de até 10 ppb (partículas por bilhão) sobre a região metropolitana de Manaus, com máxima diferença na saída da chaminé da usina, em torno de 100 ppb. Na Figura 4 é possível visualizar com maior clareza a pluma de poluição de CO gerada pelo incremento da termoeletrica de Mauá. Embora sutil, há uma diferença do campo mensal médio, que se apresenta maior em Manaus e estende-se até o município vizinho de Iranduba, representando uma diferença média menor do que 3ppb.

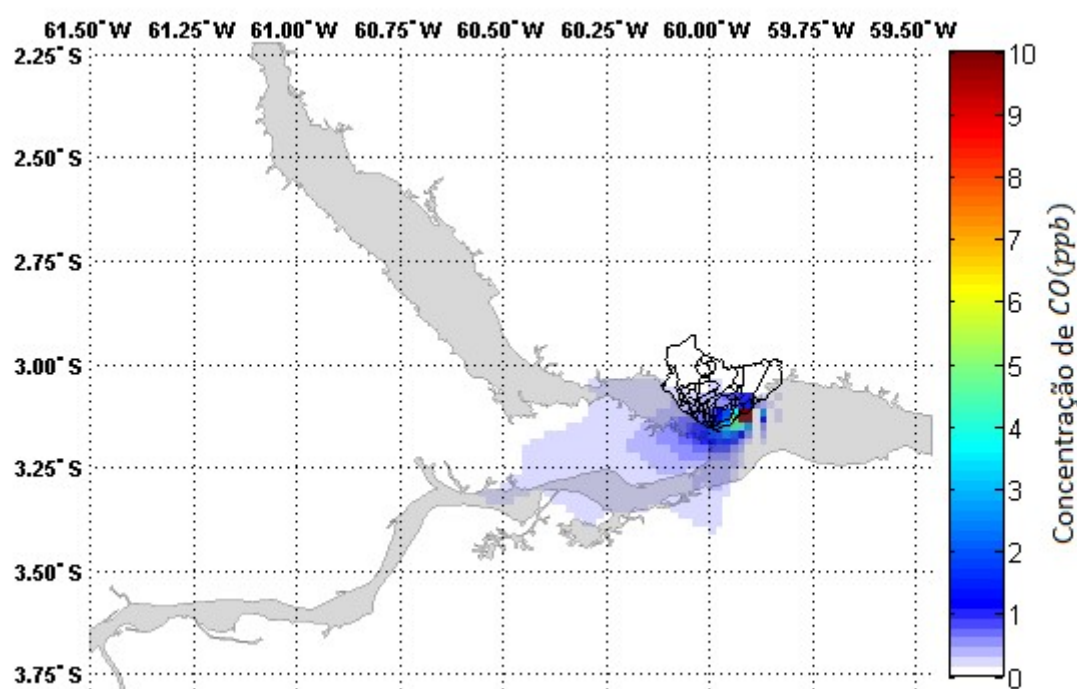


Figura 4. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de CO.

Outro gás analisado é o ozônio (O_3), gás que próximo à superfície é altamente poluente e em altas concentrações afeta de maneira significativa a saúde animal e vegetal. A Figura 5 apresenta a concentração média mensal de ozônio para o período de março de 2014, usando a mesma metodologia descrita na Figura 2, ou seja, no intervalo de 8 horas da fotoquímica. Essa metodologia é sobretudo importante na descrição do ozônio, o qual é um poluente secundário gerado a partir de relações complexas entre as concentrações de compostos orgânicos voláteis (abundantes na região a partir de fontes biogênicas) e de óxidos nitrogenados (NO e NO_2), que em contato com radiação solar, geram e consomem ozônio em processos cíclicos. As concentrações características de ozônio, dessa forma,

são significativas durante a janela da fotoquímica e quase zero durante a noite, uma vez que não há radiação solar disponível nesse período para a formação do composto.

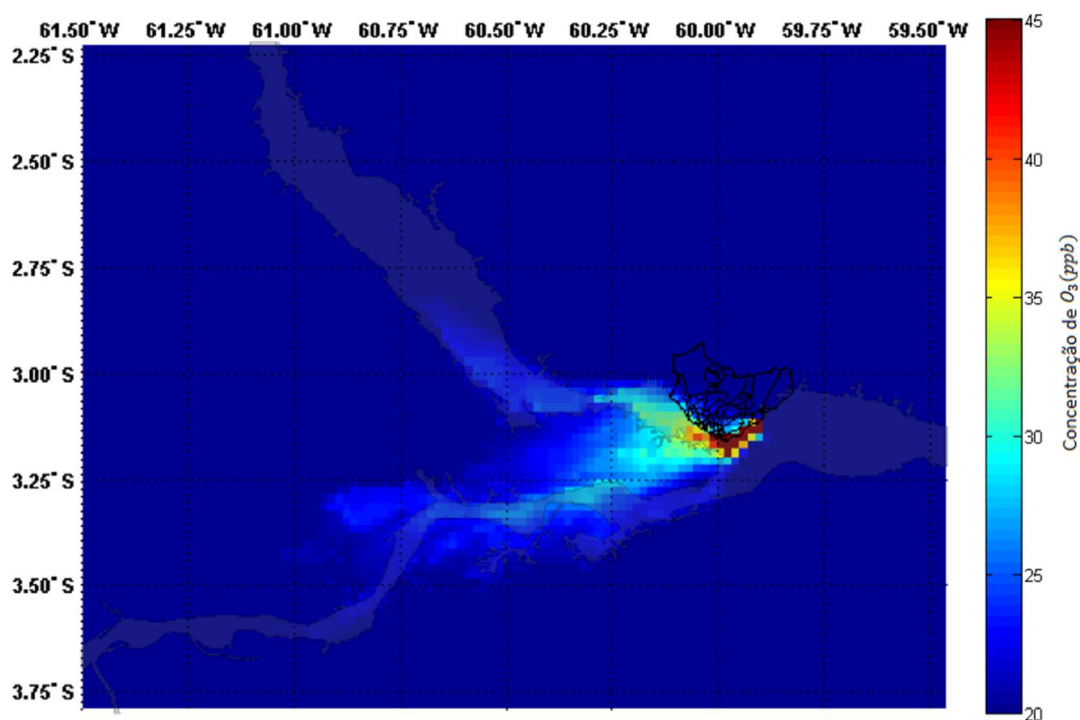


Figura 5. Campo médio mensal de O₃ para o mês de março de 2014, sendo a 2ª rodada simulada, com adição da usina termelétrica de Mauá 3.

As concentrações de ozônio obtidas nas simulações são coerentes com os valores esperados e apresentadas em outros trabalhos para a região (Martin et. al., 2017, Medeiros et. al., 2017, 2017b). É possível ver que a pegada da pluma de poluição de ozônio é significativamente maior do que a pegada encontrada para o CO. Isso se dá pois, como supracitado, o ozônio é um composto secundário gerado a partir de reações fotoquímicas. O NO é rapidamente consumido nas reações de formação de ozônio, o que o gera quase instantaneamente. Já o tempo na atmosfera do NO₂ é maior, tendo suas reações de geração de ozônio mais lentas. Isso pode explicar a pluma de poluição chegando até Iranduba e Manacapuru, mesmo em médias mensais. É possível ainda ver a influência da presença dos rios na dispersão de poluentes, causando um efeito de canalização parcial da pluma de poluição de Manaus, pelos ventos locais.

Observou-se ainda que as maiores concentração de ozônio encontram-se na região da localização da usina. Obteve-se máxima emissão de 45 ppb, para um intervalo médio mensal, concentrando-se próximo a fonte emissora. E quanto maior a distância em relação a fonte emissora menor a concentração de O₃, tendo em vista que o ozônio formado pode

ser limitado pelas concentrações de COVs e/ou NO_x , presentes na atmosfera. Em locais com relativa abundância de NO_x , em relação aos COVs, o ozônio tipicamente irá decrescer mais rapidamente se forem reduzidas as emissões de COVs e neste caso a literatura define a atmosfera como COVs limitante (razão baixa). Por outro lado, em locais com NO_x -limitante (razão alta), ou seja em atmosferas com altas concentrações de COVs em comparação com as de NO_x (como é o caso da região amazônica), a redução de NO_x é mais efetiva no controle de ozônio, porém até um certo limiar, pois caso contrário um decréscimo nas emissões de NO_x pode causar um aumento no ozônio devido à redução do consumo de O_3 pelo NO e/ou redução da formação de ácido nítrico (Martins et.al, 2007).

Em outras palavras, tem-se que os óxidos de nitrogênio e COVs participam de reações de formação e consumo de O_3 , a sua relação não é linear. Comumente a dependência entre a produção de O_3 e as concentrações iniciais de COV e NO_x é representada por um gráfico de isopleias, que é um diagrama que apresenta uma elevação no quadrante superior direito (Seinfeld and Pandis, 2006). O formato desta elevação é variável de acordo com a região de interesse e dos compostos presentes da atmosfera. Assim, quando há excesso de COV na atmosfera, a concentração de O_3 será mais dependente da concentração de NO_x , e vice-versa (Schirmer et al., 2010).

A Figura 6 apresenta a concentração média mensal da diferença para o O_3 , tendo em vista as duas rodadas, sendo 2º rodada menos a 1º rodada, para o mesmo intervalo fotoquímico citado.

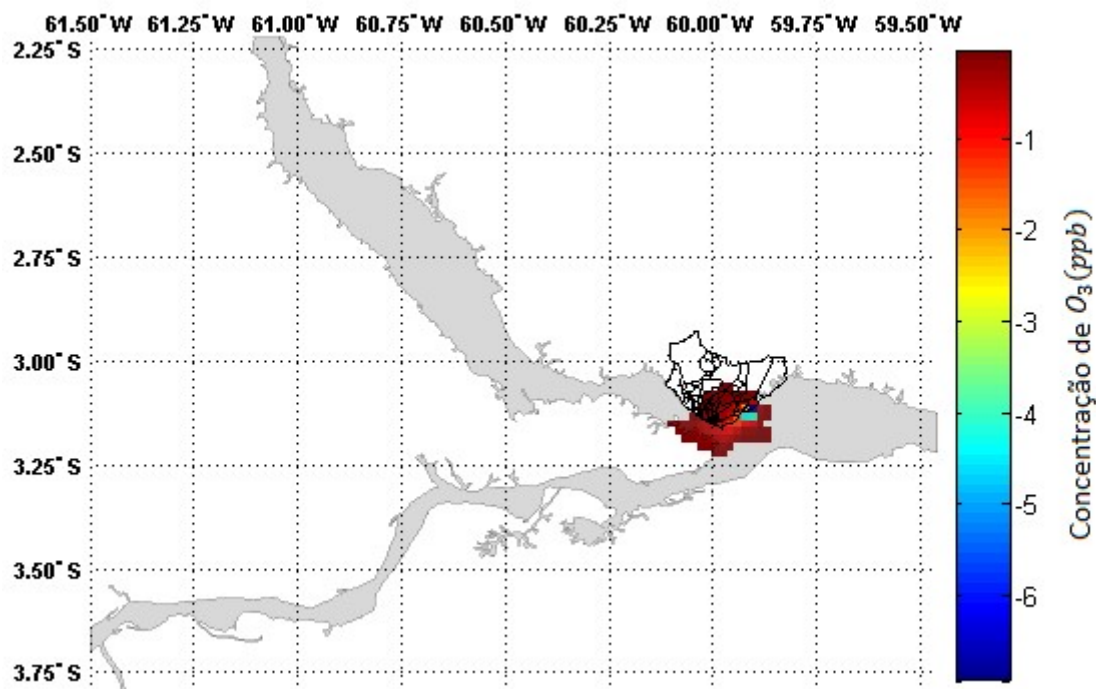


Figura 6. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de O_3 .

Mostrando a não-linearidade das reações de formação de ozônio, as concentrações de ozônio sofreram um decréscimo na região imediatamente acima da usina termoelétrica de Mauá, mesmo após o incremento das emissões oriundas de Mauá 3. Isso ocorre uma vez que parte do ozônio existente na região acima da chaminé é consumido quase que instantaneamente pelo NO adicional emitido por Mauá 3 (Cirino et al., 2018). Em outras palavras, as concentrações de NO_x são incrementadas pela termoelétrica de Mauá 3, levando a uma redução relativa da formação de ozônio e OH nas proximidades da região da fonte, uma vez que a proporção de VOC/NO_x tornou-se suficientemente baixa, fazendo com que a formação de O_3 fosse inicialmente suprimida, provavelmente em favor da produção eficiente de HNO_3 , removendo assim o NO_x da participação adicional nos ciclos de formação de O_3 (Neuman et al., 2002; Ryerson et al., 2001, 2003, Daum et al., 2000; Luria et al., 1999; Nunnermacker et al., 2000). Após esse decréscimo rápido de ozônio, esse NO emitido em contato com os $COVs$ abundantes na região voltam a formar ozônio, tornando a diferença positiva na região fora da zona da termoelétrica.

Após a primeira análise espacial das concentrações dos poluentes CO e O_3 em comparação direta entre os dois cenários simulados, fez-se uma análise quantitativa a partir de diagramas de caixa (boxplots), considerando três áreas compreendendo os municípios de Manaus, Iranduba e Manacapuru. A Figura 7 apresenta as áreas

consideradas para a análise dos diagramas de caixa que serão apresentados a seguir. Essa seleção baseou-se na análise da região de Manaus e vento abaixo, para acompanhar o caminho da pluma de poluição oriunda da capital amazonense.

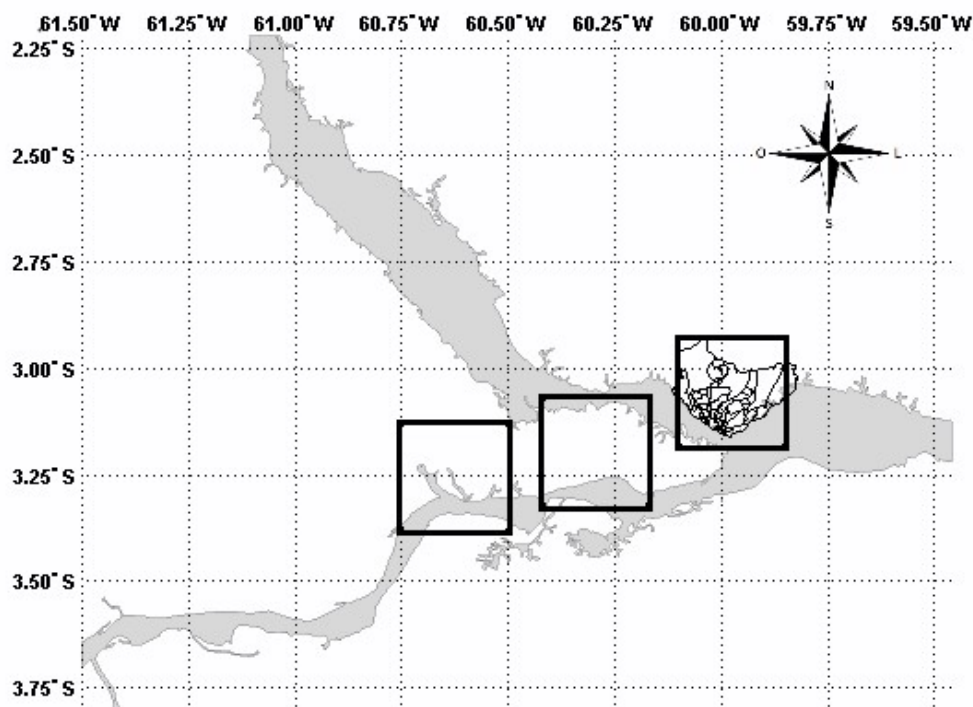


Figura 7. Áreas selecionadas para o estudo. Da direita para a esquerda, as áreas representam os municípios de Manaus, Iraduba e Manacapuru, respectivamente. Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 8 apresenta os diagramas de caixas referentes a 1º rodada padrão, 2º rodada de inserção da usina e diferença entre as rodadas (sempre considerando a segunda menos a primeira) para as concentrações de CO, para a área acima do município de Manaus (área representada mais à direita na Figura 7). Observou-se que para o município de Manaus tanto para a primeira rodada simulada, quanto para a segunda rodada a mediana permaneceu entre 130ppb a 140ppb, no entanto, com outliers e máximos maiores para a segunda rodada. Os diagramas de caixas contemplam as médias mensais para as horas de fotoquímica, seguindo o raciocínio descrito nas análises anteriores. Na Figura 8, as horas 1-8 representadas no eixo das abcissas correspondem ao intervalo entre 09:00h e 16:00h, hora local. Observou-se que a mediana da diferença variou entre 1ppb e 1,3ppb, com máximos de 2ppb e outliers de até 3ppb, o que indica que a diferença média entre os dois cenários foi de cerca de 1% para o município de Manaus.

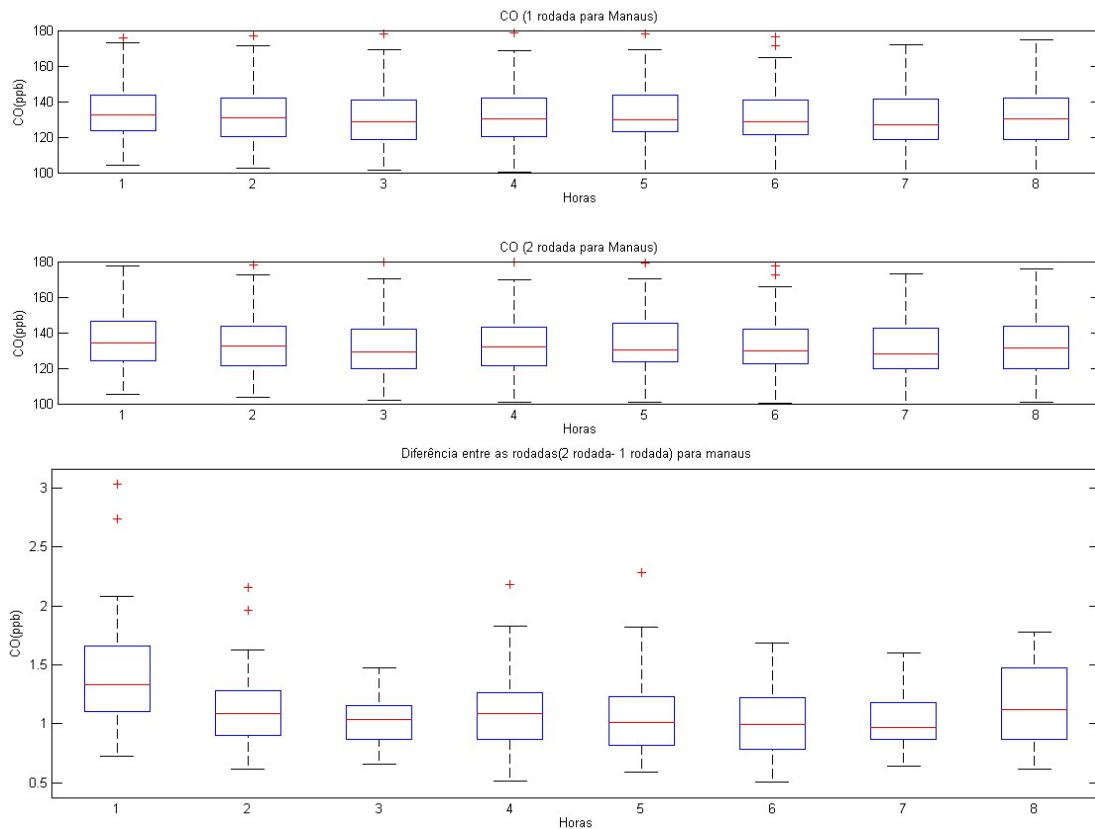


Figura 8. Diagrama de caixas da média na área de Manaus para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários do CO. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Manaus para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.

Já a Figura 9 representa a mesma metodologia descrita na análise da Figura 8, mas para a área de Iranduba, município vizinho e vento abaixo de Manaus. Observou-se que para as duas simulações a mediana permaneceu acima de 120ppb, com máximos e outliers maiores para a segunda rodada. Para a diferença entre as rodadas, observou-se um pequeno aumento, onde a mediana variou entre 0,1ppb a 0,3ppb. No entanto, com máximos de até 1,5ppb e outlier de até 3ppb. Dessa forma, é possível ver que o efeito médio do incremento da usina de Mauá 3 é inferior a 0.5% para o município de Iranduba.

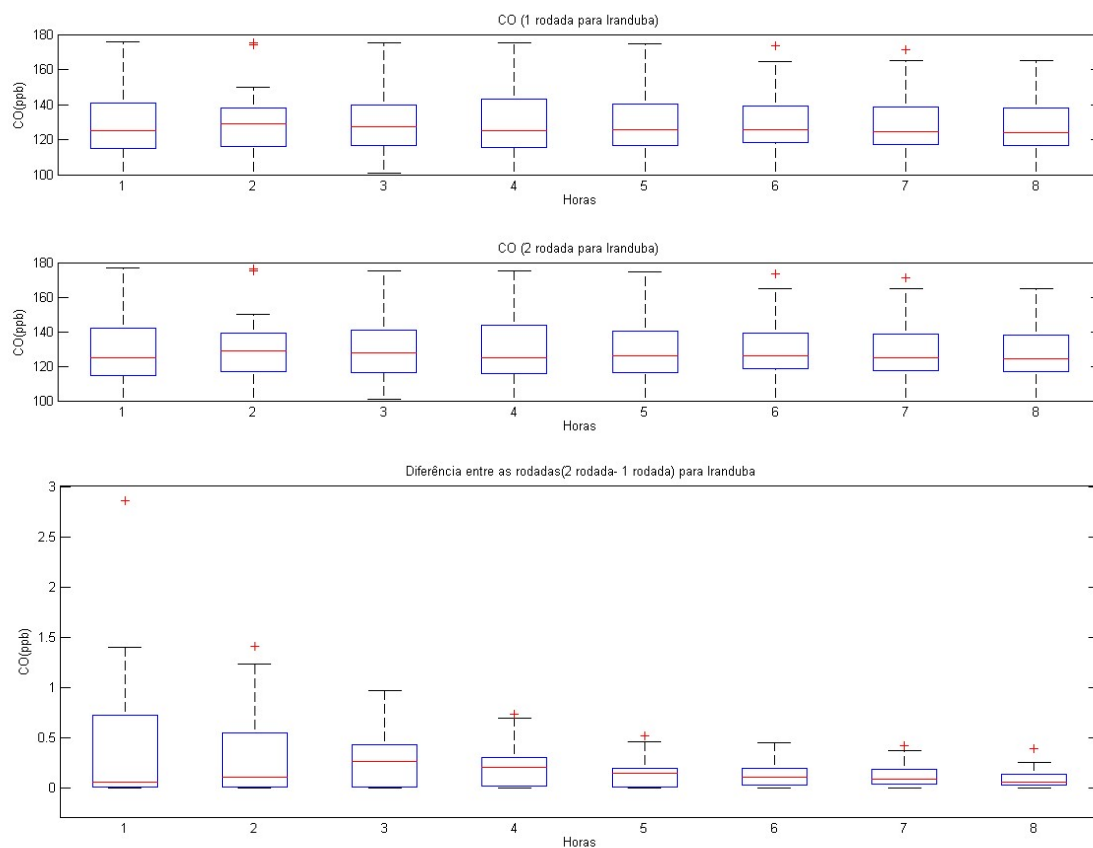


Figura 9. Boxplots da média na área de Iranduba para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários do CO. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Iranduba para as duas rodadas simuladas, sendo a 2^o rodada menos a 1^o rodada.

A Figura 10 apresenta os diagramas de caixas sobre o município de Manacapuru, contendo os dados utilizando o mesmo padrão feito para as Figuras 8 e 9. Manacapuru é uma cidade situada a cerca de 90 km a sudoeste de Manaus, ou seja, mais distante do que o município de Iranduba. Embora esteja situado vento abaixo de Manaus, o incremento nas concentrações médias de CO, devido ao incremento de Mauá, são desprezíveis nesse município. Nesse caso, o CO é considerado praticamente inerte nessa escala espaço-temporal, o que afasta a hipótese de consumo e/ou formação de CO no seu trajeto até Manacapuru. Observou-se que a mediana não variou, obtendo como mínimo 0ppb e 0,05ppb, com máximos de até 0,4ppb e outliers de até 1,2ppb.

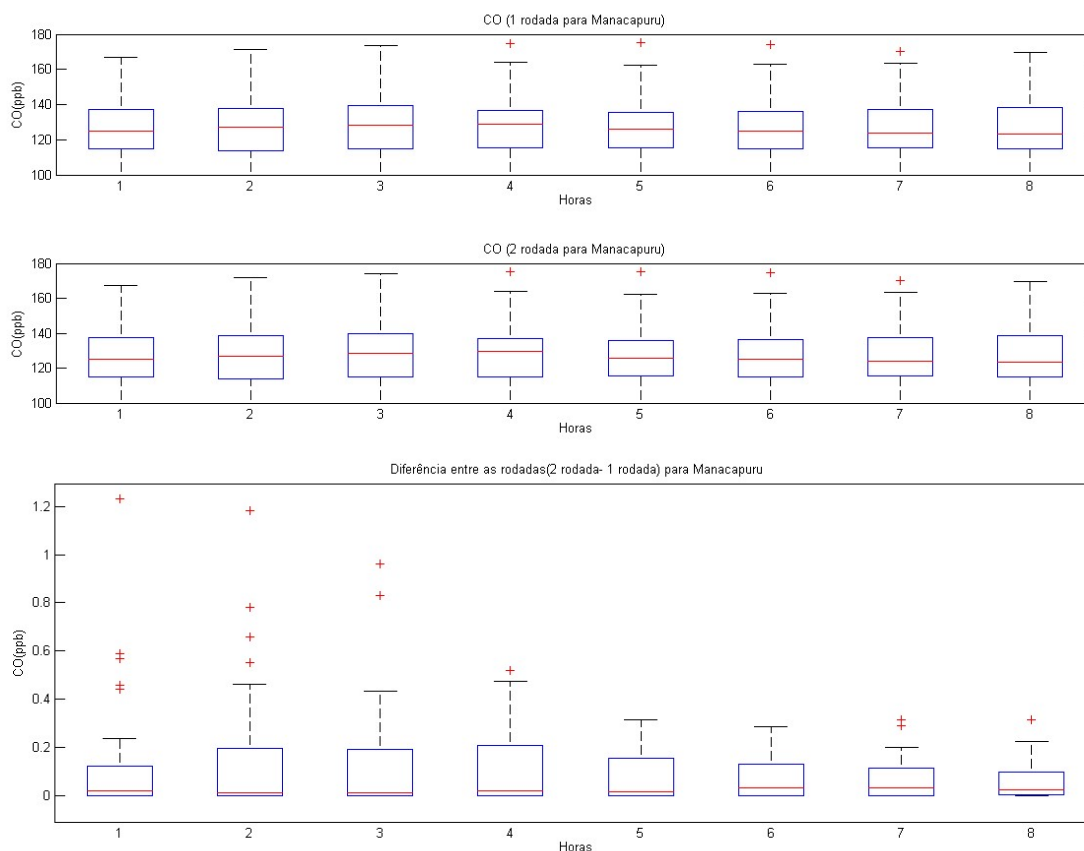


Figura 10. Boxplots da média na área de Manacapuru para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários do CO. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Manacapuru para as duas rodadas simuladas, sendo a 2ª rodada menos a 1ª rodada.

Após a análise quantitativa dos efeitos da nova termoelétrica de Mauá 3 nas concentrações de CO em Manaus, Iranduba e Manacapuru, fez-se a análise comparativa utilizando a mesma metodologia proposta nas análises feitas nas Figuras 8, 9 e 10, mas dessa vez para o ozônio. A Figura 11 apresenta os diagramas de caixas para as concentrações de O₃ nos dois casos simulados e para a diferença entre eles na área correspondente ao município de Manaus. Observou-se que as concentrações de ozônio para a primeira e segunda rodadas representaram a mediana variando entre 17ppb a 22ppb, com máximos maiores para a primeira rodada e outliers entre 30ppb e 43ppb. Observou-se para a diferença valores negativos com a mediana variando entre -0,1ppb e -0,3ppb, com o máximo de até -0,8ppb e outliers variando de -0,4ppb a -0,8ppb, representando saldo maior da primeira rodada em relação a segunda. Isso corrobora a discussão feita para a Figura 6, ou seja, houve um decréscimo de ozônio na área

imediatamente acima da área da usina, o que é explicado pela não-linearidade das reações de formação de ozônio, como discutido anteriormente. Como o valor absoluto do decréscimo de ozônio foi maior do que o incremento subjacente (que ocorreu em grande parte fora da área de Manaus), a mediana da diferença apresentou-se negativa, mesmo considerando o intervalo temporal de fotoquímica que favorece a formação de ozônio.

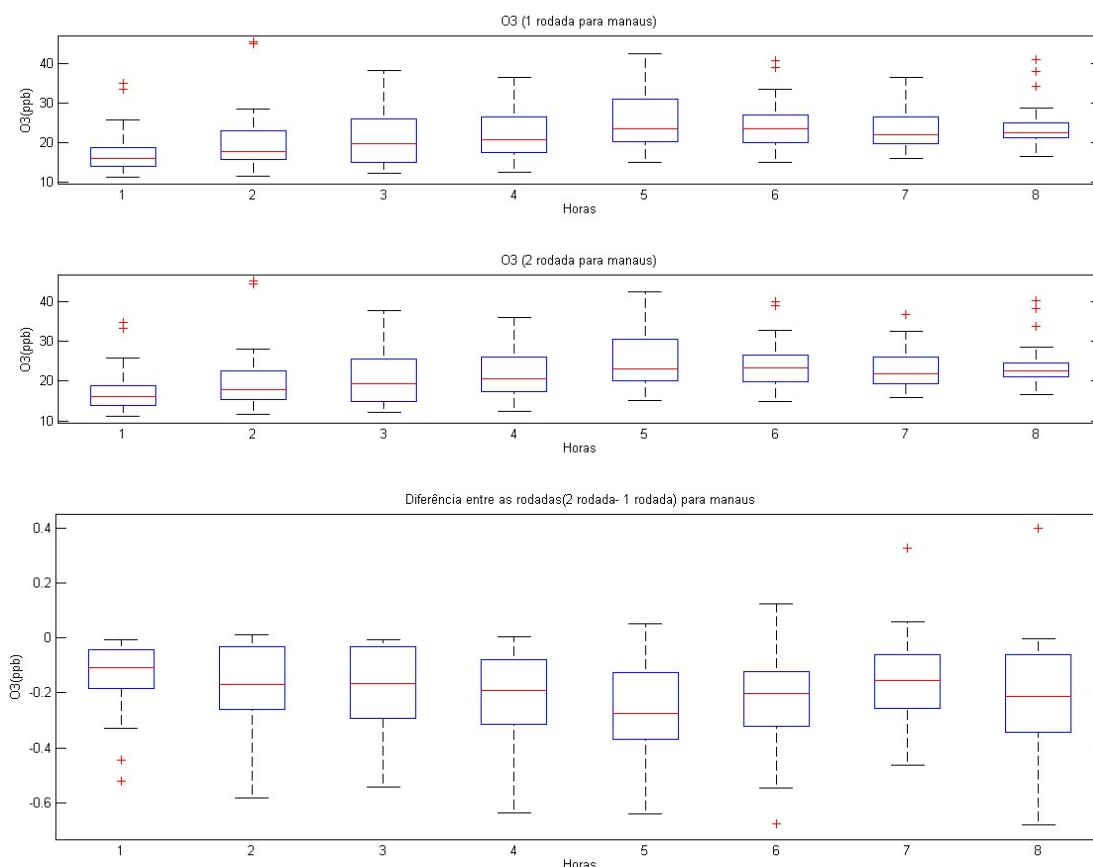


Figura 11. Boxplots da média na área de Manaus para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários de O₃. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Manaus para as duas rodadas simuladas, sendo a 2º rodada menos a 1º rodada.

Tal qual feito para a Figura 11, a Figura 12 apresenta os diagramas de caixas referentes aos cenários simulados e a diferença entre eles para o município de Iranduba. Observou-se que a mediana para as duas rodadas variou entre 18ppb e 22ppb, com máximo de até 50ppb e outliers com máximo de 70ppb. Seguindo a tendência apresentada nas figuras anteriores, a diferença média entre os cenários mostrou-se mínima (próxima de zero). É possível observar que há um ciclo no gráfico que mostra a diferença entre os cenários, em que fica claro que a formação de ozônio a partir da nova termoeletrica é potencializado pela máxima fotoquímica (a partir das 12:00h, horário local, na Figura

correspondendo à hora 4). Esse padrão continua, com diferenças positivas nas horas seguintes, mostrando que o consumo e a formação de ozônio são altamente dependentes dos padrões de incidência de radiação solar, como esperado e reportado na literatura (Seinfeld e Pandis, 2006).

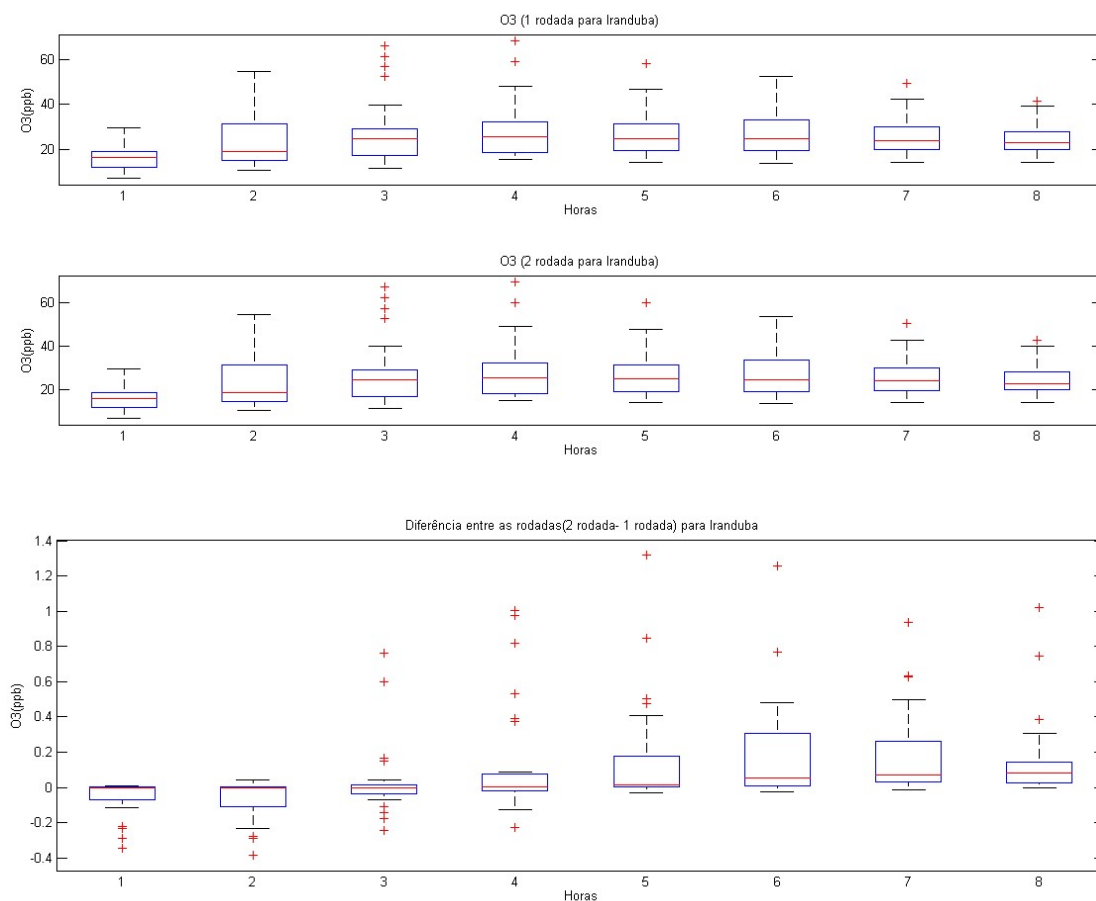


Figura 12. Boxplots da média na área de Iranduba para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários de O₃. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre a médias da área de Iranduba para as duas rodadas simuladas, sendo a 2^o rodada menos a 1^o rodada.

Seguindo as anteriores, a Figura 13 apresenta a análise das concentrações de O₃ para Manacapuru. Observou-se que a mediana para concentração de ozônio das duas rodadas variou entre 10ppb a 20ppb, com máximos de até 40ppb e outliers de até 80ppb. A diferença entre as rodadas apresentou diagrama de caixa levemente positivo, entretanto a mediana permaneceu em torno de zero, o que mostra que a instalação da nova termoelétrica movida a gás natural não impôs influência nas concentrações de ozônio em Manacapuru para o período analisado.

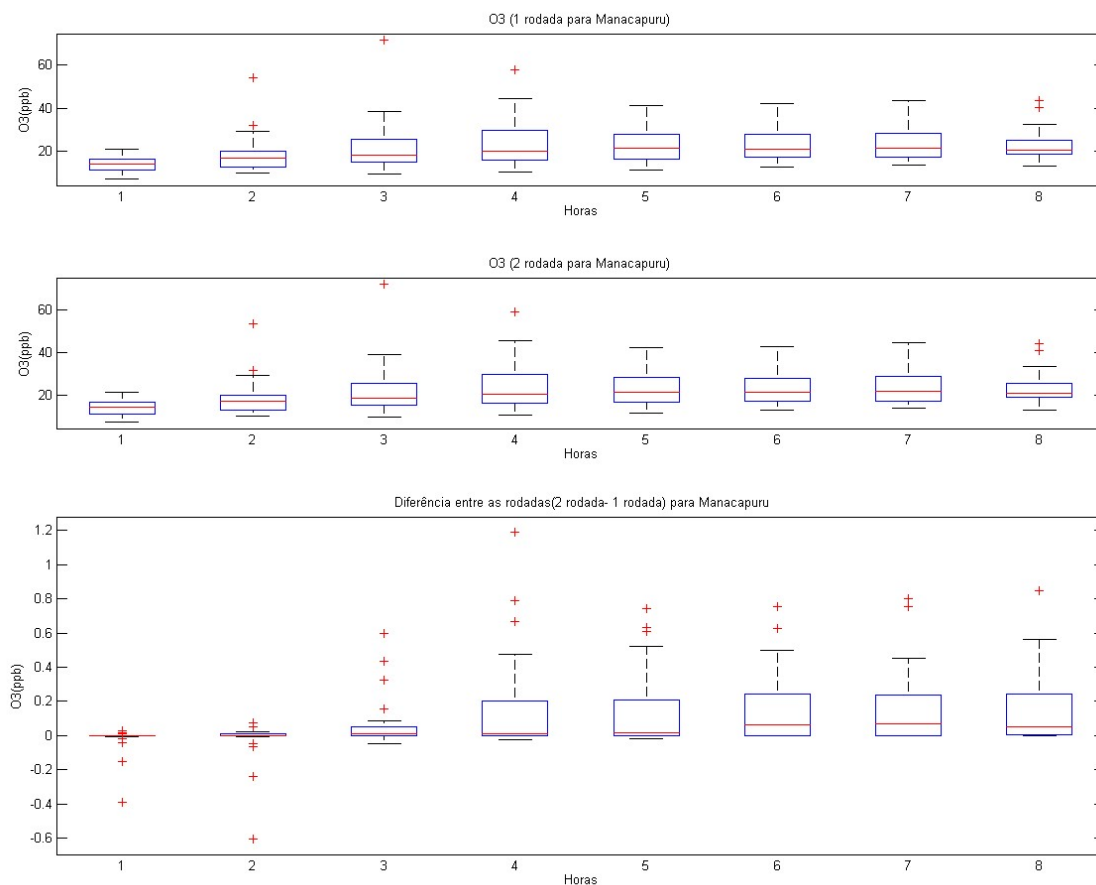


Figura 13. Boxplots da média na área de Manacapuru para o mês de março de 2014, analisando-se o ciclo de 8 horas diários de O₃. Para a primeira rodada simulada e segunda rodada simulada. Boxplot da Diferença entre as médias da área de Manacapuru para as duas rodadas simuladas, sendo a 2^o rodada menos a 1^o rodada.

Por fim, apresenta-se uma análise dos campos médios da diferença entre os dois cenários para o material particulado fino (PM_{2.5}) (Figura 14) e grosso (PM₁₀) (Figura 15). A análise quantitativa não foi feita para esses compostos, uma vez que as configurações utilizadas na modelagem realizada (parametrizações e inventários) não foram validadas para tais poluentes em trabalhos anteriores, como foi feito para O₃, CO e NO_x. Todavia, o modelo pode dar uma boa ideia sobre o impacto de Mauá 3 na produção de material particulado sobre a região de estudo, pela diferença entre os dois cenários de simulações realizadas.

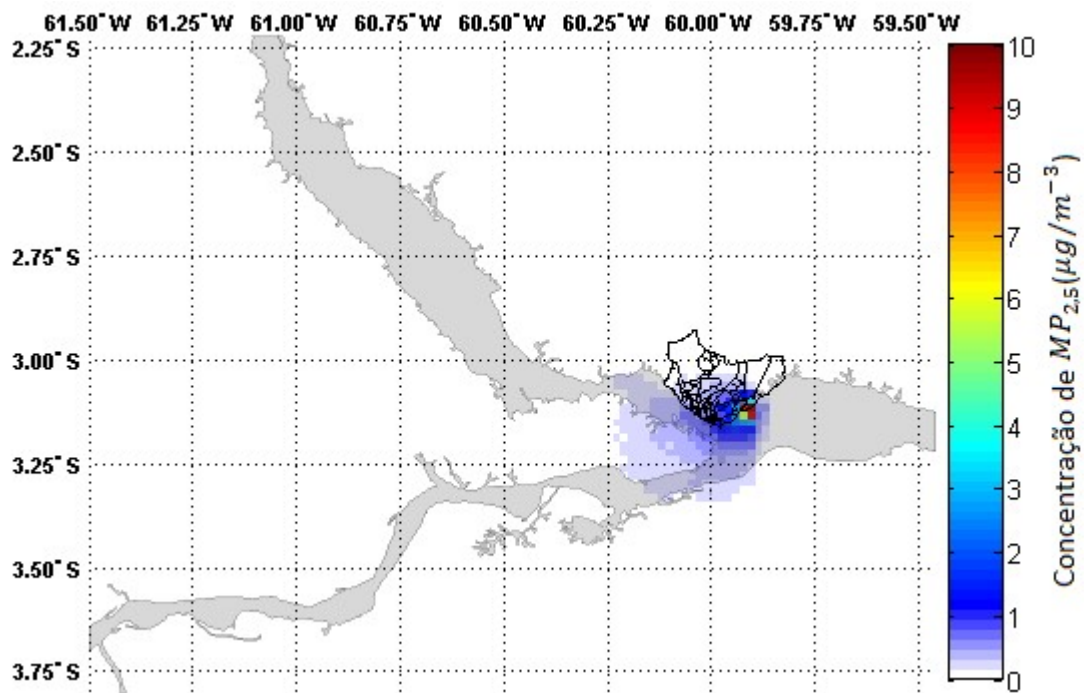


Figura 14. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de $PM_{2.5}$.

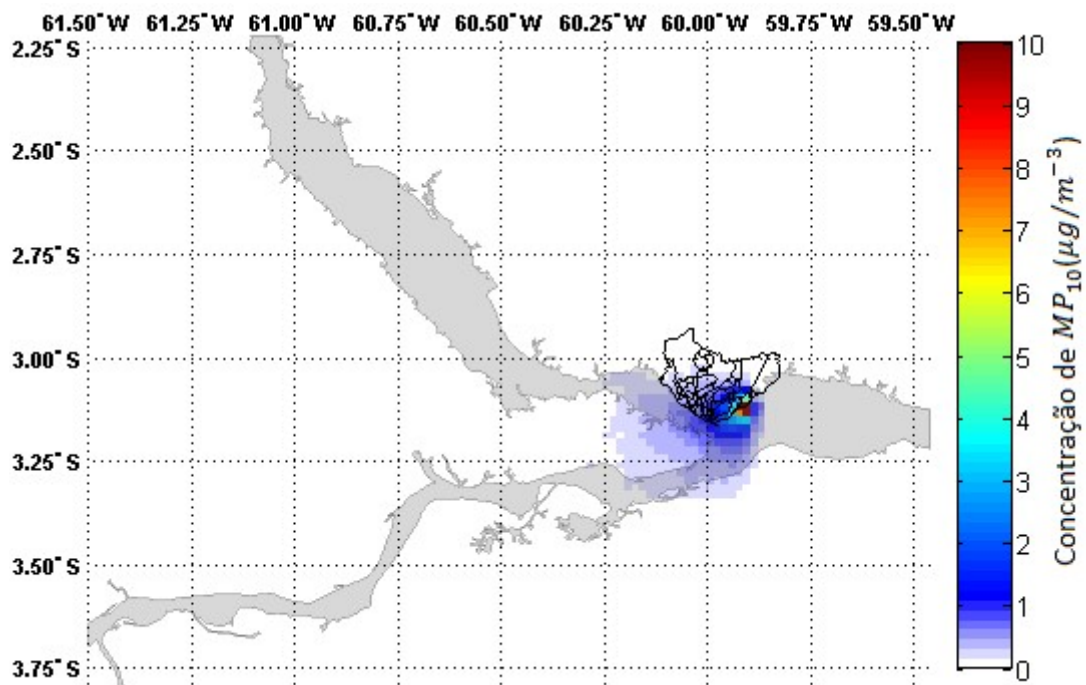


Figura 15. Diferença entre os campos médios mensais entre as duas rodadas realizadas para concentração de PM_{10} .

De forma geral, observou-se que houve um aumento na concentração de $MP_{2,5}$ (Figura 14) e de MP_{10} (Figura 15) na segunda rodada, em relação a primeira rodada. Com valores máximos de até $40 \mu g/m^{-3}$ sobre a chaminé da usina para $MP_{2,5}$ e de $55 \mu g/m^{-3}$ para MP_{10} , viu-se que o aumento representou um incremento de 12,5% no valor de PM2.5, para a segunda rodada em relação a primeira, e de 11,36% no valor de PM10, para a segunda rodada em relação a primeira rodada. Esse incremento mostra que apesar de um aumento significativo do material particulado na área próxima à usina, esse aumento percentual é baixo se comparado com o potencial de geração energética da nova planta termoelétrica. É importante lembrar que para a planta de Mauá, essa nova termoelétrica representa um aumento de 128% da geração de energia, enquanto representa um aumento de 41% na geração total de energia por termoelétricas em Manaus. Dessa forma, salienta-se que o uso do gás natural representa influência percentual de alteração da qualidade do ar urbana de Manaus, Iranduba e Manacapuru significativamente baixo, em comparação com o percentual energético instalado.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se avaliar o impacto na qualidade do ar da instalação da usina termelétrica de Mauá 3, a qual funciona com a utilização de gás natural. Buscou-se avaliar a influência dos gases emitidos por esta fonte na pluma de poluição de Manaus e, conseqüentemente, o impacto do transporte desta pluma nas cidades de Iranduba e Manacapuru, localizadas a sudoeste de Manaus (vento abaixo). Tendo em vista o período escolhido de intensa precipitação, no qual a influência da queima de biomassa pode ser negligenciada, levando a maior representatividade da análise dos dados provenientes da queima de combustível pela usina termelétrica. Observou-se que para o ozônio o impacto da instalação da usina termelétrica de Mauá 3 foi mínimo. Para a região de Manaus houve uma diminuição de 1,71% da emissão de O₃, da segunda rodada em relação à primeira rodada. Como também houve uma redução de 39,60% da concentração de ozônio sobre o ponto de localização da usina. Na medida que a pluma de poluição era transportada para demais áreas presentes nesse estudo, observou-se que houve um aumento de 0,46% da concentração de O₃ no município de Iranduba, na segunda rodada em relação à primeira rodada e, conseqüentemente, um aumento de 0,60% da concentração de O₃ no município de Manacapuru, também na segunda rodada em relação à primeira. A variabilidade do ozônio, observada nesse estudo, está em consonância, com estudos recentes como o de Medeiros e colaboradores (2017), onde como resultado da mudança da matriz energética realizada, concluiu-se que para a simulação onde as matrizes energéticas eram todas substituídas por queima de gás natural, houve uma redução da concentração de ozônio em relação às simulações realizadas com matrizes energéticas que utilizavam queima de óleo diesel e óleo combustível.

Ademais, o impacto observado para CO, também foi desprezível, tendo em vista, como anteriormente citado, que é um resultado da emissão direta da usina, sendo utilizado na formação de gases secundários. Obteve-se para região de Manaus um aumento de 0,90% da concentração de CO, com um aumento no valor máximo de 75% da concentração de CO sobre o ponto de localização da usina, dando seqüência observou-se um aumento de 0,20% para a região de Iranduba e de 0,03%, para a região de Manacapuru, todas referentes à segunda rodada em relação à primeira. Esse resultado está em consonância com o trabalho de Breeze (2014), no qual concluiu que na queima de usinas por gás natural, o monóxido de carbono é emitido de forma direta podendo ter

valores maiores se for utilizada a tecnologia nos queimadores com baixo teor de óxido de nitrogênio. Por fim, a análise do aumento percentual realizada para os materiais particulados fino e grosso ($MP_{2,5}$ e MP_{10}) mostrou um aumento de 12,5% para o $MP_{2,5}$ e de 11,36% de aumento para e MP_{10} , concentrando-se localmente. No entanto, foi observado um aumento no valor máximo de $MP_{2,5}$ de 95,04% e um aumento de até 125% para e MP_{10} no ponto da localização da usina de Mauá 3. Outro trabalho referente à redução de ozônio é o de Frost e colaboradores (2006), onde avaliaram os efeitos do de NO_x das usinas de energia nas concentrações de ozônio no leste dos Estados Unidos. A relação entre emissões e redução da concentração de ozônio era complexa, dependendo das concentrações de NO_x contra o vento. Para baixas concentrações contra o vento, uma redução nas emissões de NO_x reduziu a concentração de ozônio, enquanto para altas concentrações a favor do vento, uma diminuição igual de NO_x resultaram em menores reduções no ozônio ou mesmo o aumento de O_3 .

Nesse estudo, conclui-se que não houve impacto gerado na pluma de poluição, pelos gases de O_3 e CO sobre as regiões de estudo. Tendo em vista que somente foi alterado um parâmetro no modelo, adicionando-se a potência geradora da usina de Mauá 3. Observou-se que a variabilidade da concentração dos gases estudados concentrou-se localmente, sobre a usina. Houve menores valores de variação sobre as cidades abordadas, em que à medida que o gás emitido/gerado se distanciava da chaminé da usina, os valores de concentração dos gases diminuam. Conclui-se que a qualidade do ar não é afetada de maneira significativa pela emissão de uma única usina termelétrica com queima de gás natural, em até 328 MW de potência adicional. No entanto, permite-se uma futura discussão para o impacto de futuras termelétricas instaladas na região amazônica com queima de gás natural e a influência desses gases emitidos na pluma de poluição para a vida e saúde dos cidadãos. Assim, a partir desse estudo será possível entender melhor as relações entre as emissões de gases gerados por usinas termelétricas e a pluma de poluição no período chuvoso sobre a Amazônia, o que poderá auxiliar grupos de pesquisas que trabalham com modelagem de química atmosférica e melhorando a representação dos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera da região amazônica, sob influência de fontes emissoras antropogênicas. Além do interesse científico, faz-se necessário ampliar os estudos sobre o ozônio troposférico, óxidos de nitrogênio e materiais particulados para a adoção de políticas públicas que visem manter a taxa permitida pelos principais órgãos de controle, garantindo a boa qualidade do ar na região.

SÍNTESE

O presente trabalho buscou avaliar o impacto na qualidade do ar atmosférico da instalação da Usina termelétrica de Mauá 3, na emissão dos gases de CO , O_3 , $PM_{2,5}$ e PM_{10} na cidade de Manaus, Amazonas. A análise foi simulada utilizando o WRF-CHEM com dados obtidos da campanha intensiva do projeto GOAMAZON 2014/5, realizada no período de 1 de fevereiro a 31 de março de 2014. Neste trabalho foram utilizados os dados para o período de março de 2014, as análises dos dados foram realizadas para superfície e foram delimitadas três regiões de estudo, as regiões dos municípios de Manaus, Iranduba e Manacapuru. Os intervalos utilizados foram para o intervalo fotoquímico de 8 horas, analisados os períodos entre 9:00 h e 16:00 h, hora local, para CO e O_3 e de 24 horas para o material particulado fino e grosso. O presente estudo mostrou que não houve impacto na pluma de poluição por meio da emissão dos gases de CO e O_3 nas três regiões estudadas, havendo apenas alterações na variabilidade de concentração dos gases, próximo à fonte emissora. No entanto, foi possível observar que houve uma diminuição da concentração de O_3 , de 1,71% sobre a região de Manaus e uma diminuição de até 39,6% da concentração de ozônio sobre o ponto da localização da usina termelétrica de Mauá 3, tendo como base a premissa de que o ozônio produzido é rapidamente consumido pelo NO produzido. O maior impacto percentual foi visto na emissão de material particulado fino e grosso representando 12,5% e 11,36% de aumento de $PM_{2,5}$ e PM_{10} respectivamente, mas que se concentrou na região da usina com valores máximos percentuais de 95,04 % de aumento de $MP_{2,5}$ e de 125% de aumento de MP_{10} sobre a chaminé da usina. Para o CO foram observados aumentos dos valores máximos de 75% sobre a chaminé da usina. A partir desse estudo será possível entender melhor as relações entre as emissões de gases gerados por usinas termelétricas e a pluma de poluição no período chuvoso sobre a Amazônia, o que poderá auxiliar grupos de pesquisas que trabalham com modelagem numérica melhorando a representação dos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera da região amazônica, sob a influência de fonte emissoras antropogênicas, por queima de combustíveis fósseis. Além do interesse científico, faz-se ampliar os estudos sobre o ozônio troposférico, óxidos de nitrogênio e materiais particulados para a adoção de políticas públicas que visem manter a taxa permitida pelos principais órgãos de controle ambiental, mantendo a boa qualidade do ar na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Maria de Fatima. et al. **Air quality forecasting system for Southeastern Brazil**. 2015.

ANDREA, E. M. O. et al. **Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the Amazon Basin during the wet and dry seasons**, 2012.

ANDRADE, M. D. F; FREITAS, E. D; YNOUE, R. Y; TODESCO, E; VARA, A. V; IBARRA, S; MARTINS, L. D; MARTINS, J; CARVALHO, V. S. **Air quality forecasting system for southeastern Brazil**, Front. Environmental Science, disponível em < <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00009>. Acesso em: outubro de 2019.

ARAGÃO, L.E.O.C., Poulter, B., Barlow, J.B., Anderson, L.O., Malhi, Y., Saatchi, S., et al. 2014. Environmental Change and the Carbon Balance of Amazonian Forests. *Biological Reviews*, 89: 913-931. <https://doi.org/10.1111/brv.12088>.

BECKER, Karl Heinz et al. **Tropospheric ozone pollution**, environmental and ecological chemistry – Vol. I s.d.

BELA M. M.; Longo, K.M. S. R. Freitas; Moreira, D. S.; Beck, V.; Wofsy, S. C.; Gerbig, C.; Wiedemann, K.; Andreae, M.O.; Artaxo, P.. Ozone production and transport over the Amazon Basin during the dry-to-wet and wet-to-dry transition seasons. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 757–782, 2015. doi:10.5194/acp-15-757-2015.

BETTS, A., Gatti, L. V., Cordova, A. M., Silva-Dias, M. A. F., and Fuentes, M. 2002. Transport of ozone to the surface by convective downdrafts at night, *J. Geophys. Res.*, 107, (D20), doi:10.1029/2000JD00158.

BRETT, B. Palm. et al. **Secondary organic aerosol formation from ambient air in an oxidation flow reactor**: In central Amazonia, 2017.

BRETT, B. Palm. et al. **Secondary organic aerosol formation from ambient air in an oxidation flow reactor**: In central Amazonia, 2018.

BREEZE, P. (2014). *Natural Gas-fired Gas Turbines and Combined Cycle Power Plants. Power Generation Technologies*, 67–91.

BROOK, Robert D. **Inhalation of Fine Particulate Air Pollution and Ozone Causes Acute Arterial Vasoconstriction.** In *Healthy Adults*, 2002.

CALDERÓN, Mario Eduardo Gavidia. et al. Impacto das condições de contorno químicas na representação do ozônio troposférico na Região Metropolitana de São Paulo com o modelo WRF-Chem. 2015.

COELHO, Silas de Oliveira. et al. **Avaliação das Emissões Atmosféricas das Principais Termelétricas Brasileiras a Gás Natural**, 2013

COSTA, Patricia Dos Santos. et al. **Concentração do ozônio em dois sítios experimentais da região metropolitana de Manaus:** medidas em superfície e estimativas remotas (2015).

DUFFY, P.B., Brando, P., Asner, G.P., Field, C.B., 2015. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 13172–13177. <https://doi.org/10.1073/pnas.1421010112>

DUNCAN, B. N. e Logan, J. A., 2008. Model analysis of the factors regulating the trends and variability of carbon monoxide between 1988 and 1997. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 8, pp. 7389-7403.

FROST, G. J. et al. **Effects of changing power plant NO_x emissions on ozone in the eastern United States:** Proof of concept, 2006.

G. P. Brasseur, R. G. Prinn, A. A. P. Pzenny, *Atmospheric Chemistry in a Changing World* (Springer, Berlin, 2003).

GLAUBER, Cirino. et al. **Observations of Manaus urban plume evolution and interaction with biogenic emissions.** In: GoAmazon 2014/5, 2018.

GUENTHER, A. B; JIANG, X; HEALD, C. L; SAKULYANONTVITTAYA, T; DUHL, T; EMMONS, L. K; WANG, X. The **Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1):** an extended and updated framework for modeling biogenic emissions, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1471-1492, <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>, 2012.

IPCC, 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001).

JANSSENS-MAENHOUT, G.. et al, **HTAP_v2.2:** a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution (2015).

JOHN, E. Shilling. et al. **Aircraft observations of the chemical composition and aging of aerosol.** In: the Manaus urban plume during GoAmazon 2014/5 2018.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. Increasing concentrations of CO and O₃ rising deforestation rates and increasing tropospheric carbon monoxide and ozone in Amazonia. *Environmental Science and Pollution Research*.3: 210-212, 1996.

KUHN, U. et al. **Impact of Manaus City on the Amazon Green Ocean atmosphere:** ozone production, precursor sensitivity and aerosol load, 2010.

LINDSAY, D. Yee. et al. **Observations of sesquiterpenes and their oxidation products.** In: central Amazonia during the wet and dry seasons, 2018).

LISBOA, Henrique de Melo. **CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA,** Florianópolis: Abril, 2008.

LOGAN, J.A.; Prather, M. J.; Wofsy, S.C.; Mcelroy, M. B. Tropospheric chemistry: A global perspective, J. Geophys. Res., 86, 7210-7254, 1981.

MANISH, Shrivastava. et al. **Urban pollution greatly enhances formation of natural aerosols over the Amazon rainforest**, 2019.

MARTIN, S. T. et al. Introduction: Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5). Atmos. Chem. Phys., v. 16, n. 8, p. 4785-4797, 2016. ISSN 1680-7324. Disponível em: <http://www.atmos-chemphys.net/16/4785/2016/> Acesso em 2019.

MARTIN. S.T. et al. **Introduction: Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon** (GoAmazon2014/5) (2016).

MARTIN. S.T. et al. **The Green Ocean Amazon Experiment** (GoAmazon2014/5) Observes Pollution Affecting Gases, Aerosols, Clouds, and Rainfall over the Rain Forest (2016)

MARTINS, Leila Droprinchinski. et al. **Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na região metropolitana de São Paulo** 2006.

MAGALHÃES, Mateus da Rocha. et al. **Influência do uso de condições de contorno de compostos químicos e de diferentes mecanismos químicos no modelo wrfchem nas concentrações de ozônio durante o projeto Goamazon 2014**. 2017.

MEDEIROS, A. S. **In preparation: Effects of Power Plant Fuel Switching on air quality**. In a tropical environment. 2016.

MEDEIROS, Adan S.S. et al. **Power plant fuel switching and air quality**. In: a Tropical Forested Environment, 2017.

MEDEIROS, Adan S.S. et al. **Local emission inventory of a megacity**. In: central Amazon: Simulations of NO_x and O₃ using WRF-Chem 2017.

MEDEIROS, Adan S.S. et al. **River Breezes for Pollutant Dispersion.** In: GoAmazon2014/5. 2017.

MONKS, P.S., A. T. Archibald, A. Colette, O. Cooper, M. Coyle, M., et al. 2015. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to shortlived climate forcer. Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union (EGU),15(15), pp. 8889-8973.

NOAA. WRF-Chem Emissions Guide 2015.

SÁ, Suzane S. de. et al. **Influence of urban pollution on the production of organic particulate matter from isoprene epoxydiols.** In: central Amazonia (2017).

SÁ, Suzane S. de. et al. **Urban influence on the concentration and composition of submicron particulate matter.** In: central Amazonia, (2018).

SÁ, Suzane S. de. et al. **Contributions of biomass-burning, urban, and biogenic emissions to the concentrations and light-absorbing properties of particulate matter.** In: central Amazonia during the dry season,(2019).

SAMEH, A. Abou Rafee. et al. **Contributions of mobile, stationary and biogenic sources to air pollution in the Amazon rainforest: a numerical study with the WRF-Chem model** (2017).

SCHIRMER, Waldir Nagel et al. **COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS BIOGÊNICOS EMITIDOS A PARTIR DE VEGETAÇÃO E SEU PAPEL NO OZÔNIO TROPOSFÉRICO URBANO**,2010.

TIE, X. et al. **Impact of model resolution on chemical ozone formation in Mexico City: application of the WRF-Chem model** (2010)

TREBS, I. et al. Impact of the Manaus urban plume on trace gas mixing ratios near the surface in the Amazon Basin: Implications for the NO-NO₂-O₃ photostationary state and peroxy radical levels. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D5, 2012. ISSN 2156-2202.

YINGJUN, Liu .et al, **Isoprene photo-oxidation products quantify the effect of pollution on hydroxyl radicals over Amazonia**, (2018).

ZHUMING, Ying. et al. **Sensitivity of ozone concentrations to diurnal variations of surface emissions**. In: Mexico City: A WRF/Chem modeling study, 2008.